

Handlungsspielraum bei der Grundwasserbewirtschaftung des Wasserwerks A

Scope in groundwater management for waterworks A

Bachelorarbeit

Vera Behle | 1727421



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Aufgabenstellung Bachelorarbeit

für Frau Vera Behle
Matr.-Nr. 1727421
Studiengang BSc. Umweltingenieurwissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Handlungsspielraum bei der Grundwasserbewirtschaftung des Wasserwerks A

Scope in groundwater management for waterworks A

Hintergrund

Das Wasserwerk A versorgt ca. 130.000 Einwohner der umliegenden Städte und Gemeinden mit jährlich mehr als 6,5 Mio. m³ Trinkwasser aus 21 Tiefbrunnen.

Problemstellung:

Sein Handlungsspielraum bei der Grundwasserbewirtschaftung wird durch zahlreiche Randbedingungen eingegrenzt: Neben den wasser- rechtlichen Vorgaben ist es insbesondere die Rohwasserbeschaffenheit einzelner Brunnen, die das Förderregime einschränkt. Hierbei geht es zum einen um die Minimierung von PSM-, Arzneimittel- und Nitratgehalten im Trinkwasser, zum anderen um die Funktionsweise und Dimensionierung der bestehenden Aufbereitung (Enteisenung, Entmanganung), deren Funktion z. B. an gewisse Mindestgehalte Eisen gebunden ist. Zusätzlich sind als Parameter die Brunnenleistung, die Leistung der Brunnenpumpen und die Hydraulik der Transportleitungen von den Brunnen zum Wasserwerk zu berücksichtigen.

Bachelorarbeit:

Im Rahmen der Bachelorarbeit sollen zunächst das derzeitige Steuerungsregime und die aktuell auftretenden Betriebszustände analysiert und bewertet werden. Hierbei ist das gesamte Spektrum der aktuellen Bedarfsdeckung (geringer Bedarf, mittlerer Bedarf, Spitzenbedarf) zu betrachten.

Fachbereich
Bauingenieurwesen
und Geodäsie

IWAR

Prof. Dipl. - Ing. Dr.
nat. techn. Wilhelm
Urban

Wasserversorgung und
Grundwasserschutz

Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 - 3939
Fax +49 6151 16 - 3758
w.urban@iwar.tu-darmstadt.de
www.iwar.bauing.tu-
darmstadt.de

Datum
22.05.2014

Ihre Nachricht

Unser Zeichen

Sparkasse Darmstadt
Konto Nr. 704 300
BLZ 508 501 50
IBAN: DE365 085 015 000 007
043 00
BIC: HELADEF1DAS
Steuernr. 07 226 00139
Ust.-ID-Nr. DE 111 608 628



Im nächsten Schritt sind verschiedene

- Bewirtschaftungsszenarien

aufzustellen und zu bewerten. U. a. geht es um die Kompensation einer 6-monatigen Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I bis V zum Wasserwerk durch Mehrförderung aus anderen Brunnen. Als weiterer Aspekt soll untersucht werden, welche Parameter die aktuell größtmögliche Förderung aus den Brunnen XIV bis XIX bestimmen.

Der Handlungsspielraum des Wasserwerks A bei der Bewirtschaftung seiner Grundwasserressourcen soll systematisch aufgezeigt und bewertet werden. Vorschläge zur Erweiterung dieses Handlungsspielraums sind zu entwickeln.

Arbeitsschritte

- Technische Datenerhebung für die Brunnen, Rohrleitungen und die Beschaffenheit der geförderten Rohwässer
- Beschreibung des aktuellen Steuerungsregimes und der Betriebszustände der Brunnen bezogen auf die aktuelle Bedarfsdeckung
- Entwicklung, Beschreibung und Bewertung von realen Bewirtschaftungsszenarien zur Substitution der geförderten Wassermengen aus Brunnen I bis V über einen Zeitraum von 6 Monaten durch geeignete andere Brunnen
- Bestimmung und Berechnung der Parameter, welche die größtmögliche Förderung aus den Brunnen XIV bis XIX bestimmen
- Zusammenfassung und Aufzeigen allfälliger weiterer Handlungsspielräume

Empfohlene Literatur:

Datenquellen werden vom Wasserwerk A und BGS Umwelt bereitgestellt

Betreuung:

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Dr.-Ing. Heiko Gerdes

Bearbeitungszeit:

4 Monate

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Vera Behle

Matrikelnummer: 1727421

Studiengang: B.Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Bachelorarbeit

Thema: Handlungsspielraum bei der Grundwasserbewirtschaftung des Wasserwerks A / Scope in groundwater management for waterworks A

Eingereicht: 06.10.2014

Betreuung:

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban (TU Darmstadt)

Dr.-Ing. Heiko Gerdes (BGS Umwelt)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Anlagenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	9
1.1 Wasserwerk A	10
1.2 Aufgabenstellung und weiteres Vorgehen.....	10
2 Analyse des Ist-Zustands.....	12
2.1 Nomenklatur und Lage der Brunnen	12
2.2 Hydrogeologischer Hintergrund.....	14
2.2.1 Grundwasserchemie	15
2.2.2 Einteilung nach O ₂ -, NO ₃ -, Fe- und Mn-Gehalt.....	17
2.3 Brunnenkennwerte.....	18
2.4 Betrieb der Brunnen	19
2.5 Rohwasseruntersuchungen	20
2.5.1 Gesetzliche Grundlagen.....	20
2.5.2 Aktuelle Rohwasseruntersuchungsergebnisse	20
2.6 Regelung der Brunnenfördermengen	21
2.7 Wasseraufbereitung	23
2.8 Wasserrechtliche Rahmenbedingungen.....	25
3 Gesonderte Betrachtung bestimmter Wasserinhaltsstoffe	26
3.1 Nitrat.....	26
3.1.1 Allgemeines.....	26
3.1.2 Zeitliche Entwicklung des Nitratgehalts.....	26
3.2 Eisen	30
3.3 Mangan.....	30
3.4 Arzneimittel im Grundwasser.....	31
3.4.1 Clofibrinsäure	31
3.4.2 Clofibrinsäurenachweis beim Wasserwerks A	32
3.4.3 Andere Arzneimittel	35
4 Bewirtschaftungsszenarien	37
4.1 Randbedingungen	37
4.2 Berechnungsgrundlagen	38
4.3 Szenario I: Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I-Va	39

4.3.1	Zusätzliche Randbedingungen für das Szenario I	39
4.3.2	Ermittlung der geeigneten Fördermengen	40
4.3.3	Ergebnis.....	41
4.4	Szenario II: Größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XIX	42
4.4.1	Zusätzliche Randbedingungen für das Szenario II	42
4.4.2	Ermittlung der geeigneten Fördermengen	43
4.4.3	Ergebnis.....	43
4.4.4	Erhöhung des Nitratgehalts am Brunnen XVIII	45
5	Erweiterung des Handlungsspielraums des Wasserwerks A	46
5.1	Zu erwartende Nitratgehalte	46
5.2	Zusätzliche Randbedingungen in Bezug auf die Förderung mit Hilfe eines Ersatzbrunnens	48
5.3	Ermittlung der geeigneten Fördermengen	48
5.4	Ergebnis.....	48
6	Leitungshydraulik.....	51
6.1	Berechnungsgrundlagen	52
6.2	Rauheit k.....	54
6.3	Netzberechnungssoftware STANET	54
6.4	Beispielhafte Bemessung einer Sammelleitung	55
7	Zusammenfassung	57
Anlage	.....	LIX
Quellenverzeichnis	.....	LXXXVI
Literatur	.....	LXXXVI
Internetquellen	.....	LXXXVI
Sonstige Quellen	.....	LXXXVI
Eidesstattliche Erklärung	.....	LXXXVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des Wasserwerks A	10
Abbildung 2: Lage der Brunnen des Wasserwerks A.....	12
Abbildung 3: Lage der Brunnen VI-X und XIII sowie der Brunnen Ea, G, H und J	12
Abbildung 4: Lage der Brunnen I-V und der Brunnen Ea, G, H und J	13
Abbildung 5: Lage der Brunnen XIV-XIX	14
Abbildung 6: Grundwassergleichenplan im Bereich des Wasserwerks A	15
Abbildung 7: Darstellung der Wasserchemie der Brunnen anhand eines Piper-Diagramms	16
Abbildung 8: Darstellung der Wasserchemie der Brunnen mittels eines Schöller-Diagramms.....	17
Abbildung 9: Entwicklung des Nitrats an Brunnen XVIII in Bezug auf die Entnahmemenge der Brunnen XVIII und XIX	29
Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Clofibrinsäurekonzentration an den betreffenden Brunnen.....	33
Abbildung 11: Iso-Konzentrationsplan bezüglich des Nitrats mit optimalen Standort des Ersatzbrunnens	47
Abbildung 12: Entwicklung des Nitratgehalts an den Brunnen E und Ea.....	LXV
Abbildung 13: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen G	LXV
Abbildung 14: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen H	LXVI
Abbildung 15: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen J	LXVI
Abbildung 16: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen I.....	LXVII
Abbildung 17: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen II	LXVII
Abbildung 18: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen IIIa	LXVIII
Abbildung 19: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen IVa	LXVIII
Abbildung 20: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen Va	LXIX
Abbildung 21: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen VI.....	LXIX
Abbildung 22: Entwicklung des Nitratgehalts an den Brunnen VII und VIIa	LXX
Abbildung 23: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen VIII	LXX
Abbildung 24: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen IX.....	LXXI
Abbildung 25: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen X	LXXI
Abbildung 26: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XIII	LXXII
Abbildung 27: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XIV	LXXII
Abbildung 28: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XV	LXXIII
Abbildung 29: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XVI.....	LXXIII
Abbildung 30: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XVII	LXXIV
Abbildung 31: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XVIII	LXXIV
Abbildung 32: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XIX.....	LXXV
Abbildung 33: Ablagerungen in der Sammelleitung der Brunnen I-Va (1)	LXXXI
Abbildung 34: Ablagerungen in der Sammelleitung der Brunnen I-Va (2)	LXXXI
Abbildung 35: Ablagerungen in einem Leitungsrohr des Ortsnetzes des Wasserwerks A	LXXXII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittliche monatliche Fördermengen von 2010-2014	19
Tabelle 2: Einschaltreihenfolge der Brunnen	22
Tabelle 3: Aktuelle Nitratergebnisse	29
Tabelle 4: Aktuelle Clofibrinsäurekonzentrationen	32
Tabelle 5: Jährliche Clofibrinsäurefracht für das Jahr 2013.....	35
Tabelle 6: Resultierende Konzentrationen der jeweiligen Zustände des Szenarios I.....	41
Tabelle 7: Einschaltreihenfolge der Brunnen für das Szenario I.....	42
Tabelle 8: Resultierende Konzentrationen der jeweiligen Zustände des Szenarios II.....	43
Tabelle 9: Einschaltreihenfolge der Brunnen für das Szenario II	44
Tabelle 10: Vergleich der resultierenden Nitratwerte vor und nach einer Nitratsteigerung an Brunnen XVIII	45
Tabelle 11: Resultierende Konzentrationen der jeweiligen Zustände mittels des Ersatzbrunnens	49
Tabelle 12:Einschaltreihenfolge der Brunnen zuzüglich des Ersatzbrunnens.....	49
Tabelle 13: Ergebnisse der STANET-Berechnung	55
Tabelle 14: Fördermenge, Förderhöhe und Leistung der Brunnen	LX
Tabelle 15: Ergebnisse der RUV der Brunnen I-X und XIII.....	LXI
Tabelle 16: Ergebnisse der RUV der Brunnen XIV-XIX und der Brunnen Ea, G, H und J	LXII
Tabelle 17: Ergebnisse der PSM-Untersuchungen der RUV der Brunnen I-X und XIII	LXIII
Tabelle 18: Ergebnisse der PSM-Untersuchungen der RUV der Brunnen XIV-XIX und der Brunnen Ea, G, H und J	LXIV
Tabelle 19: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario I; erste Einschaltreihenfolge	LXXVI
Tabelle 20: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario I; zweite Einschaltreihenfolge	LXXVI
Tabelle 21: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario II; erste Einschaltreihenfolge	LXXVII
Tabelle 22: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario II; zweite Einschaltreihenfolge	LXXVIII
Tabelle 23: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen mit Ersatzbrunnen; erste Einschaltreihenfolge	LXXIX
Tabelle 24: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen mit Ersatzbrunnen; zweite Einschaltreihenfolge	LXXX
Tabelle 25: Daten und Ergebnisse der STANET-Simulation der ehemaligen Sammelleitung ..	LXXXIII
Tabelle 26: Daten und Ergebnisse der STANET-Simulation der aktuellen Sammelleitung	LXXXIII

Anlagenverzeichnis

Anlage A: Fördermenge, Förderhöhe und Leistung der Brunnen	LX
Anlage B: Ergebnisse der aktuellen Rohwasseruntersuchungen.....	LXI
Anlage C: Entnahmemenge und Nitratwerte der Brunnen von 2010 bis 2014	LXV
Anlage D: Tabellen zur Ermittlung der geeigneten Fördermengen für das Szenario I	LXXVI
Anlage E: Tabellen zur Ermittlung der geeigneten Fördermengen für das Szenario II	LXXVII
Anlage F: Tabellen zur Ermittlung der geeigneten Fördermengen mittels eines Ersatzbrunnens	LXXIX
Anlage G: Bilder von Eisen- und Manganablagerungen in Leitungsrohren	LXXXI
Anlage H: Darstellung der Berechnungsergebnisse mittels STANET	LXXXIII

Abkürzungsverzeichnis

°dH = Grad deutscher Härte; Einheit der Wasserhärte

BG = Bestimmungsgrenze

BGS Umwelt = Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH

BMGS = Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit und soziale Sicherheit

DN = Diameter Nominal, Nennweite von Rohren

GJS = Gusseisen mit Kugelgraphit (früher GGG: globularer Grauguss)

GOW = gesundheitlicher Orientierungswert

GWM = Grundwassermessstelle

HLUG = Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie

KBE = Koloniebildende Einheit

k. E. n. = keine Einzelergebnisse nachweisbar

muGOK = Meter unter Geländeoberkante

müNN = Meter über Normalnull

PE-HD = Hart-Polyethylen (polyethylene high density)

PSM = Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel

PVC = Polyvinylchlorid

RUV = Rohwasseruntersuchungsverordnung

1 Einleitung

Aufgabe eines Wasserversorgers ist die Bereitstellung des notwendigen Trink- und Betriebswassers. Dazu zählen unter anderem die Förderung von Rohwasser, die Einhaltung der gesetzlichen Trinkwasserqualität sowie die generelle Verteilung des Trinkwassers inklusive der Überwachung des Rohrnetzes.

Dabei ist in der Trinkwasserverordnung festgelegt, in welcher Qualität das Trinkwasser bereitgestellt werden soll: Es sollte „so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit [...] nicht zu besorgen ist“ (§4 Satz 1, TrinkwV 2001). Des Weiteren sind in dieser Verordnung Grenzwerte oder Anforderungen im Hinblick auf bestimmte Parameter festgelegt, die einzuhalten sind. Bei einer Überschreitung steht der Wasserversorger in der Pflicht, dies dem zuständigen Gesundheitsamt zu melden, welches dann weitere Vorgehensmaßnahmen veranlassen kann (vgl. §§ 13 und 20, TrinkwV 2001). Die Grenzwerte für bestimmte Parameter wurden festgelegt, da die betreffenden Stoffe die Gesundheit gefährden können, eine karzinogene Wirkung nachgewiesen wurde oder sie in bestimmten Mengen toxisch wirken. Manche Stoffe wirken zwar nicht gesundheitsschädigend, ziehen aber gewisse negative Folgen nach sich, sodass für diese Parameter Anforderungen festgelegt wurden. Dies können beispielsweise technische Probleme wie Ablagerungen innerhalb des Leitungssystems sein.

Des Weiteren existiert eine Norm des Deutschen Instituts für Normung (DIN) bezüglich der Anforderungen an das Trinkwasser und der Versorgungsanlagen (DIN 2000: „Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen“). In dieser Norm ist unter anderem festgelegt, dass „die Anforderungen an die Trinkwassergüte [...] sich an den Eigenschaften eines aus genügender Tiefe und nach Passage durch ausreichend filtrierende Schichten gewonnenen Grundwassers einwandfreier Beschaffenheit orientieren [müssen], das dem natürlichen Wasserkreislauf entnommen und in keiner Weise beeinträchtigt wurde“ (vgl. 5.1 Grundanforderungen, DIN 2000). Das Trinkwasser sollte darüber hinaus „farblos, klar, kühl sowie geruchlich und geschmacklich einwandfrei sein“ (vgl. 5.1 Grundanforderungen, DIN 2000). Zu jeder Zeit soll das Trinkwasser in ausreichender Menge den Verbrauchern zur Verfügung stehen sowie mit ausreichendem Druck an jeder Übergabestelle (vgl. 4.2 Verfügbarkeit von Trinkwasser, DIN 2000).

In dieser Norm werden auch der Gewässerschutz und der allgemeine Schutz der Trinkwasserressource erwähnt, was unter anderem durch die Festlegung von Wasserschutzgebieten erreicht werden soll.

Unter dem Punkt 4.6 der DIN 2000 ist geregelt, dass das Wasser, welches als Trinkwasser verwendet werden soll, aufbereitet werden muss, falls es den gegebenen Anforderungen nicht entsprechen sollte. Die Norm stellt allerdings keine Grenzwerte für Wasserinhaltsstoffe zur Verfügung, sondern sagt lediglich aus, dass Stoffe im Trinkwasser nur in Konzentrationen enthalten sein dürfen, die die menschliche Gesundheit bei einer lebenslangen Verwendung dieses Wassers nicht gefährdet (vgl. 5.2.2 Physikalische und chemische Beschaffenheit, DIN 2000) und verweist bezüglich genauerer Angaben auf die gesetzlichen Anforderungen.

Auch die Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) stellt diverse Arbeitsblätter bezüglich des Bereichs Wasser zur Verfügung, die sich unter anderem auch mit der Trinkwasseraufbereitung befassen. Diese DVGW Arbeitsblätter werden im Allgemeinen oft als Planungs- und Durchführungsgrundlage verwendet.

1.1 Wasserwerk A

Das in dieser Arbeit betrachtete Fallbeispiel soll aufgrund der veröffentlichten Analyseergebnisse anonym bleiben. Damit aus der Arbeit keine negativen Folgen entstehen, werden das Wasserwerk sowie alle Hinweise auf dessen Identität anonymisiert.

Das Wasserwerk A liegt in einem Waldgebiet im östlichen Teil des Landkreises A des Bundeslandes Hessen zwischen der Gemeinde A, der Gemeinde B und der Gemeinde C (vgl. Abbildung 1). Es ist mit seinen 21 Tiefbrunnen für die Versorgung von etwa 30 Gemeinden mit insgesamt ca. 130.000 Bürgern zuständig. Im Schnitt wird jeden Tag eine Wassermenge von 18.000 m³ an die Verbraucher geliefert (Quelle A).

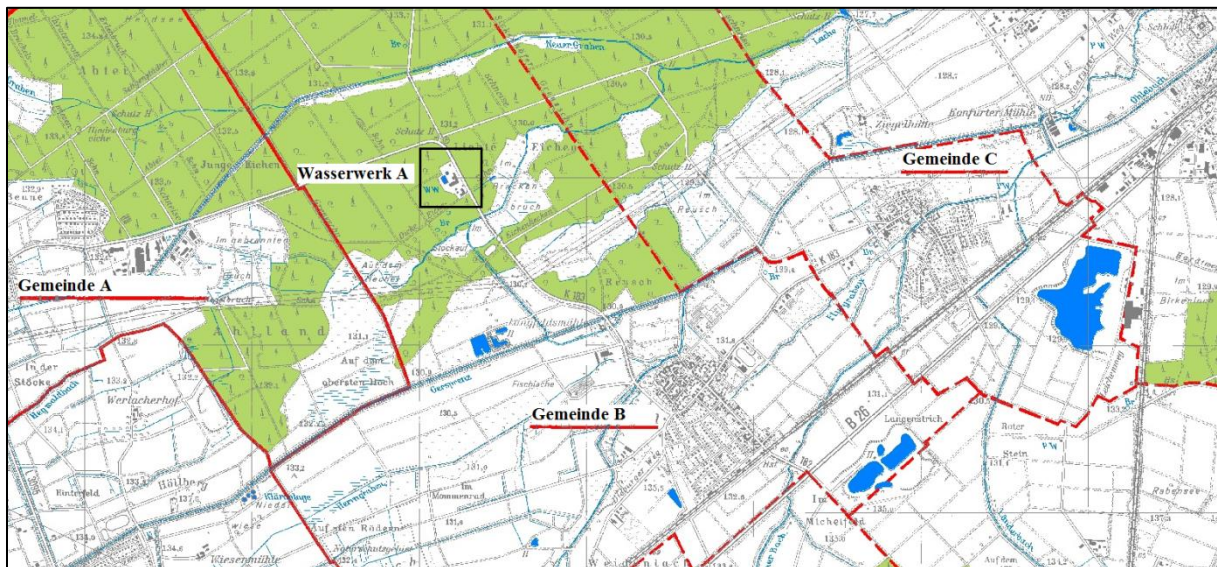


Abbildung 1: Lage des Wasserwerks A

1.2 Aufgabenstellung und weiteres Vorgehen

Im Folgenden werden zunächst das derzeitige Steuerungsregime und die aktuell auftretenden Betriebszustände des Wasserwerks A aufgezeigt. Des Weiteren wird Bezug auf die Rohwasserbeschaffenheit und daraus entstehenden Folgen genommen. Mit verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien wird einerseits aufgrund einer Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I-Va eine Mehrförderung der noch verfügbaren Brunnen sowie andererseits eine größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XIX betrachtet und bewertet. Daraufgehend wird eine Erweiterung des Handlungsspielraums des Wasserwerks A aufgezeigt.

Vor allem die Rohwasserbeschaffenheit und die wasserrechtlichen Vorgaben haben Einfluss auf die Fördermengen der einzelnen Brunnen. Dabei ist unter anderem darauf zu achten, dass man die maximal genehmigten Fördermengen der Brunnen nicht überschreitet, sowie eine bestmögliche Minimierung von Arzneimittel-, Nitrat- und PSM-Gehalten im Trinkwasser erreicht. Um die Aufbereitung des Rohwassers gewährleisten zu können, dürfen die Gehalte bestimmter Inhaltsstoffe, die der Funktion der Aufbereitung dienen, nicht unterschritten werden. Mitbestimmend für mögliche Fördermengen sind die Ergiebigkeit der Brunnen, die Leistung der Brunnenpumpen und die Hydraulik der Transportleitungen.

In einem gesonderten Abschnitt wird auf die Leitungshydraulik und daraus entstehende Bedingungen in Bezug auf die Wasserförderung näher eingegangen. Dies ist unter anderem notwendig, um bewerten zu können, ob die ermittelten Fördermengen der einzelnen Brunnen durch die vorhandenen Sammelleitungen ohne gravierende Einschränkungen befördert werden können.

2 Analyse des Ist-Zustands

2.1 Nomenklatur und Lage der Brunnen

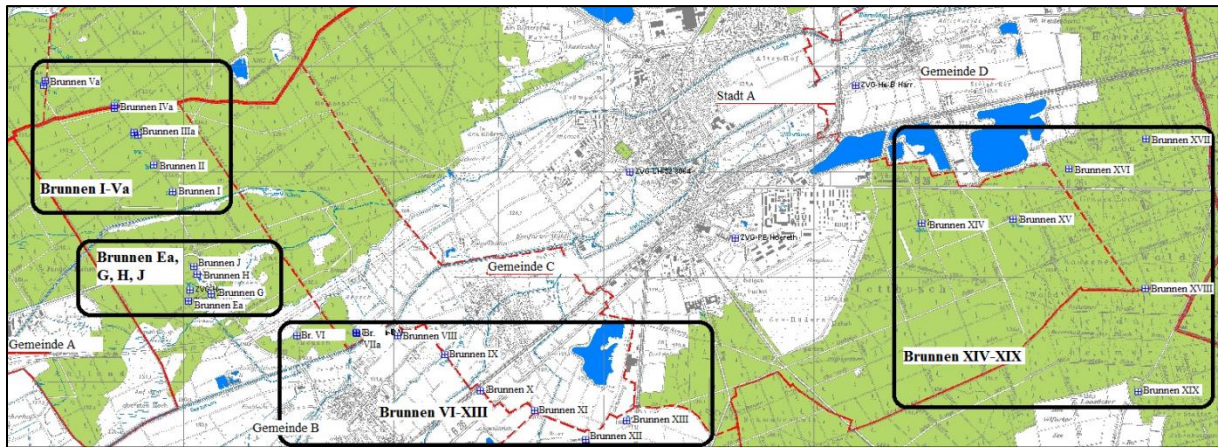


Abbildung 2: Lage der Brunnen des Wasserwerks A

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Lage der jeweiligen Brunnen des Wasserwerks A, wobei bei dieser sowie aller folgenden ähnlichen Abbildungen der Nordungspfeil in Richtung des oberen Bildrandes zu setzen ist. Zu sehen sind die Stadt A inklusive der umliegenden Gemeinde D, Gemeinde C und Gemeinde B sowie die Brunnen I-Va, VI-X und XIII, XIV-XIX und die Brunnen Ea, G, H und J. Im Westen ist darüber hinaus noch das östliche Ende der Gemeinde A erkennbar.

Zwischen der Gemeinde B und der Gemeinde C liegen die Brunnen VI-X und XIII in einem vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Bereich (vgl. Abbildung 3). Die Brunnen XI und XII liegen ebenfalls in diesen Bereich, wurden jedoch auf Grund der Erweiterung einer ortsansässigen Kiesgrube im Jahr 2005 zu Grundwassermessstellen zurückgebaut. Die Brunnen geben das geförderte Wasser in eine insgesamt 5,6 km lange Sammelleitung ab, die schließlich zum Wasserwerk führt. Dies ist eine gusseiserne Leitung mit Kugelgraphit (GJS), die abschnittsweise mit Zementmörtel ausgekleidet ist.

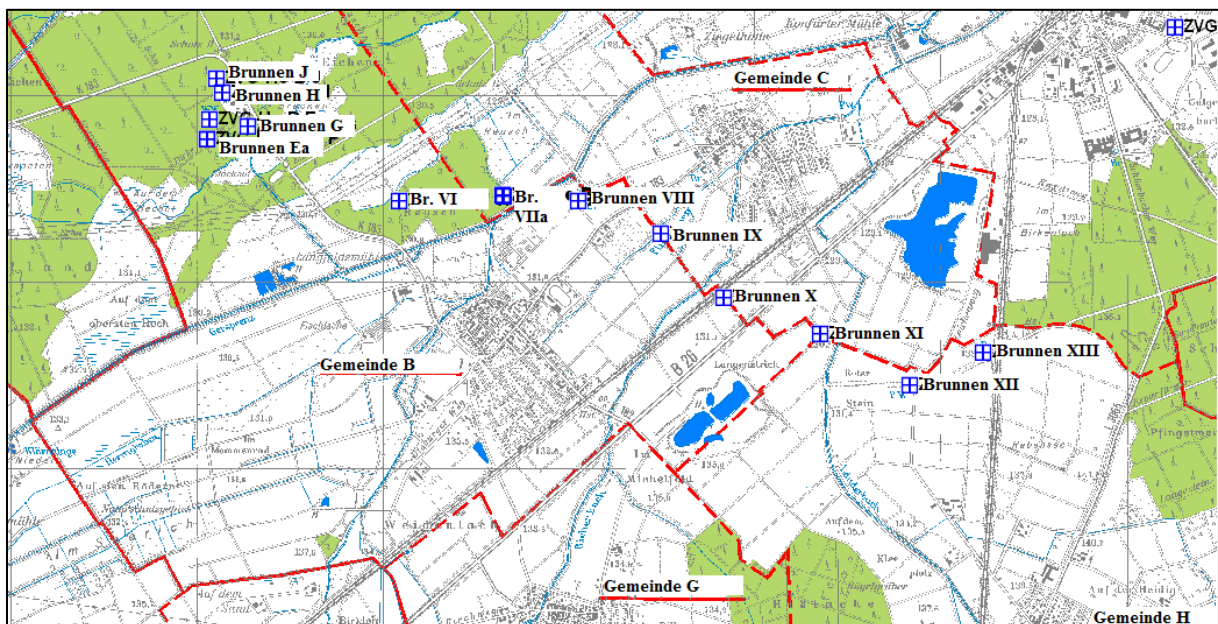


Abbildung 3: Lage der Brunnen VI-X und XIII sowie der Brunnen Ea, G, H und J

Die Brunnen I-Va befinden sich in einem Waldgebiet nördlich des Wasserwerks (vgl. Abbildung 4) und sind der Reihe nach an einer 2,7 km langen Sammelleitung angeordnet. Das Material dieser Sammelleitung ist Hart-Polyethylen (PE-HD). Die Brunnen Ea, G, H und J sind unmittelbar um das Wasserwerk selbst lokalisiert und liegen in demselben Waldgebiet (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4). Dabei liegen die Brunnen Ea und G, sowie die Brunnen H und J an einer Sammelleitung, die jeweils nicht länger als 400 m ist. Die Sammelleitung der Brunnen H und J besteht aus Polyvinylchlorid (PVC) und die der Brunnen Ea und G aus Hart-Polyethylen (PE-HD).

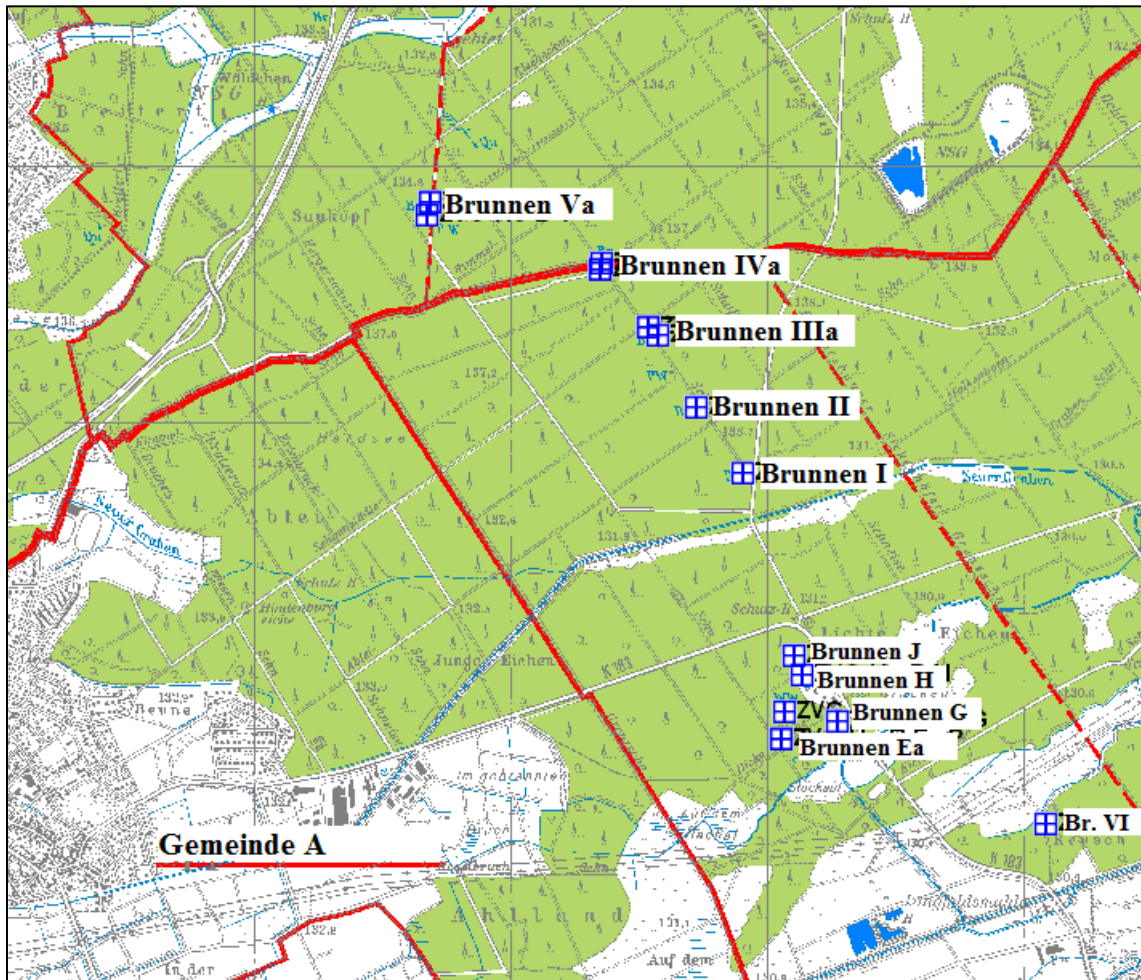


Abbildung 4: Lage der Brunnen I-V und der Brunnen Ea, G, H und J

Vom Wasserwerk am weitesten entfernt liegen die Brunnen XIV-XIX (vgl. Abbildung 5). Sie sind in einem Waldstück lokalisiert, wobei der Grundwasserzustrom vorwiegend der Brunnen XIV und XIX aus einem landwirtschaftlich genutzten Bereich erfolgt (siehe auch Punkt 2.2. Hydrogeologischer Hintergrund). Mittels einer insgesamt etwa 13 km langen Sammelleitung wird das geförderte Wasser schließlich zum Wasserwerk transportiert. Diese Sammelleitung besteht aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS), wobei abschnittsweise Zementmörtel innen aufgebracht ist.

Es werden noch weitere Brunnen im Auftrag des Wasserwerks A betrieben. Da diese aber lediglich für die Versorgung von Gemeinden direkt vor Ort zuständig sind und ihre Fördermengen daher nicht zu dem geförderten Rohwasser der bereits erwähnten Brunnen hinzukommen, welches im Wasserwerk einer Aufbereitung unterzogen wird, werden diese hier nicht weiter erläutert.

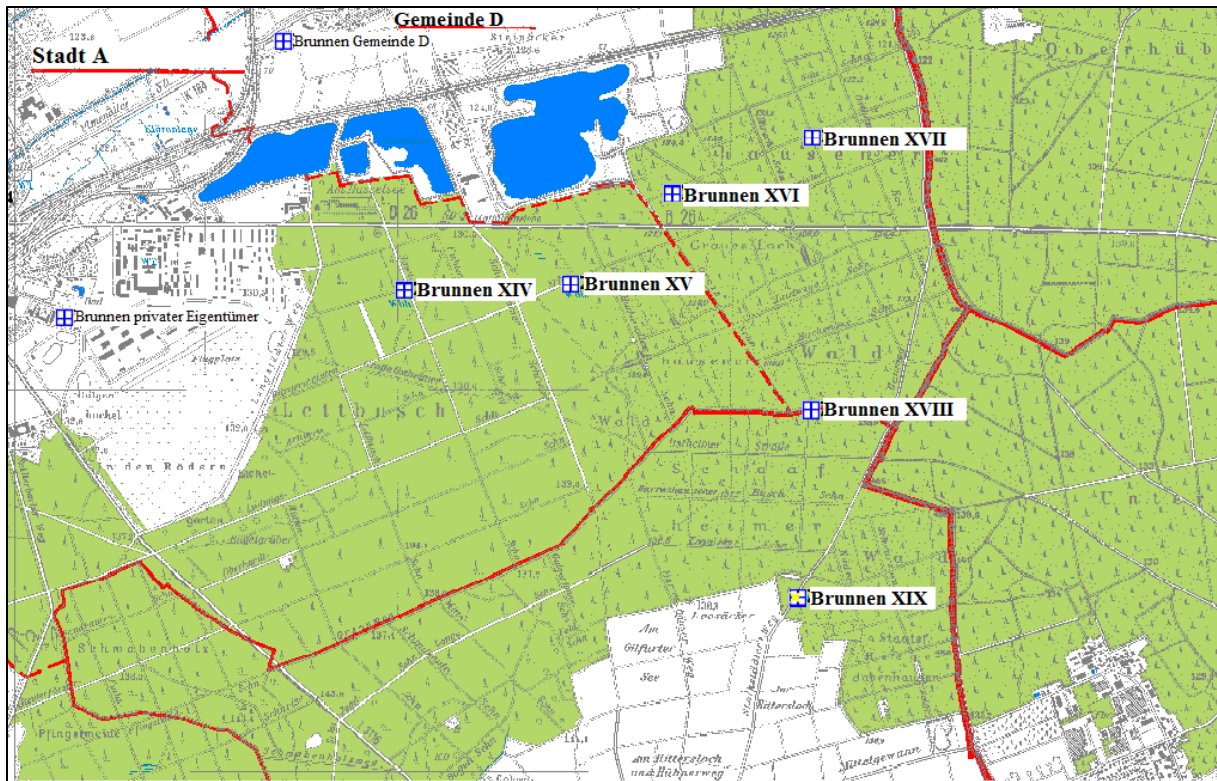


Abbildung 5: Lage der Brunnen XIV-XIX

2.2 Hydrogeologischer Hintergrund

Im Gebiet der Brunnen des Wasserwerks A bildet ein etwa 30 m mächtiger plio-/pleistozäner Lockergesteinskörper den Hauptgrundwasserleiter, wobei dieser gebietsweise mit einer Deckschicht versehen ist. Diese Deckschicht ist dabei mittels Aufschlussbohrungen im Bereich der Brunnen I-IX, XIII, Ea, G, H und J nachgewiesen worden. Die Deckschicht weist dabei ab dem Brunnen VI bis hin zum Brunnen IX eine geringer werdende Mächtigkeit auf und ist schließlich beim Brunnen X nicht mehr anzutreffen. Jedoch ist sie am Brunnen XIII mit einer vergleichbaren Mächtigkeit wie bei Brunnen VIII wieder aufzufinden. Im Bereich der Brunnen XIV-XIX liegt keine Deckschicht vor.

Der Grundwasserkörper wird teilweise durch eine tonig-schluffige Trennschicht in zwei Grundwasserstockwerke unterteilt. Dies gilt für das Grundwasser im Bereich der Brunnen I-VIIa, IX, X, XIII, Ea, G, H und J. Beim Brunnen VIII liegt eine Unterbrechung dieses Trennhorizontes vor. Dieses hydraulische Fenster ist als Grund für die relativ hohen Nitratwerte des Brunnens VIII anzusehen (vgl. Anlage B, Tabelle 15). Im Bereich der Brunnen XIV-XIX liegt keine Stockwerkstrennung vor.

Bei den Brunnen I, II, G, H und J liegen die Filterstrecken sowohl im ersten als auch im zweiten Grundwasserstockwerk, wodurch das Wasser aus beiden gefördert wird. An den Brunnen IIIa-VIIa, IX, X, XIII und Ea wird das Rohwasser lediglich aus dem zweiten Stockwerk gefördert. Da am Brunnen VIII keine trennende Schicht vorhanden ist, fördert dieser das aus beiden Stockwerken zuströmende Wasser, wobei er die Zuströmung aus dem oberen Stockwerk auf sich konzentriert.

In Abbildung 6 sind die Grundwassergleichen im Einzugsgebiet des Wasserwerks A dargestellt. Zur besseren Orientierung wurde das Wasserwerk inklusive der Brunnen Ea, G, H und J mit einem

schwarzen Rahmen gekennzeichnet. Die Daten der Grundwassergleichen stammen dabei vom Frühsommer 2014 und stellen die Grundwasseroberfläche im oberen Grundwasserleiter dar. Liegen dabei die Grundwassergleichen nah beieinander, weist dies auf ein relativ starkes Gefälle der Grundwasseroberfläche hin.

Die Grundwasserstände im Bereich des Brunnens X liegen bei 124,25 müNN und im Bereich des Brunnens XVII bei etwa 117,35 müNN. Der Wasserspiegel fällt dabei in nordöstlicher Richtung ab. Aus diesem Gefälle wird die Fließrichtung des Grundwassers ersichtlich, welche ebenfalls nach Nordost gerichtet ist. In Bezug auf die Brunnen lässt sich dabei teilweise auch die Anströmzone der jeweiligen Brunnen erkennen. Dabei liegen die Einzugsgebiete der Brunnen XIV und XIX jeweils in einem südwestlich der Brunnen gelegenen landwirtschaftlichen Bereich. Dies ist unter anderem maßgeblich für die anzutreffenden Nitratkonzentrationen (siehe auch Punkt 3.1. Nitrat).

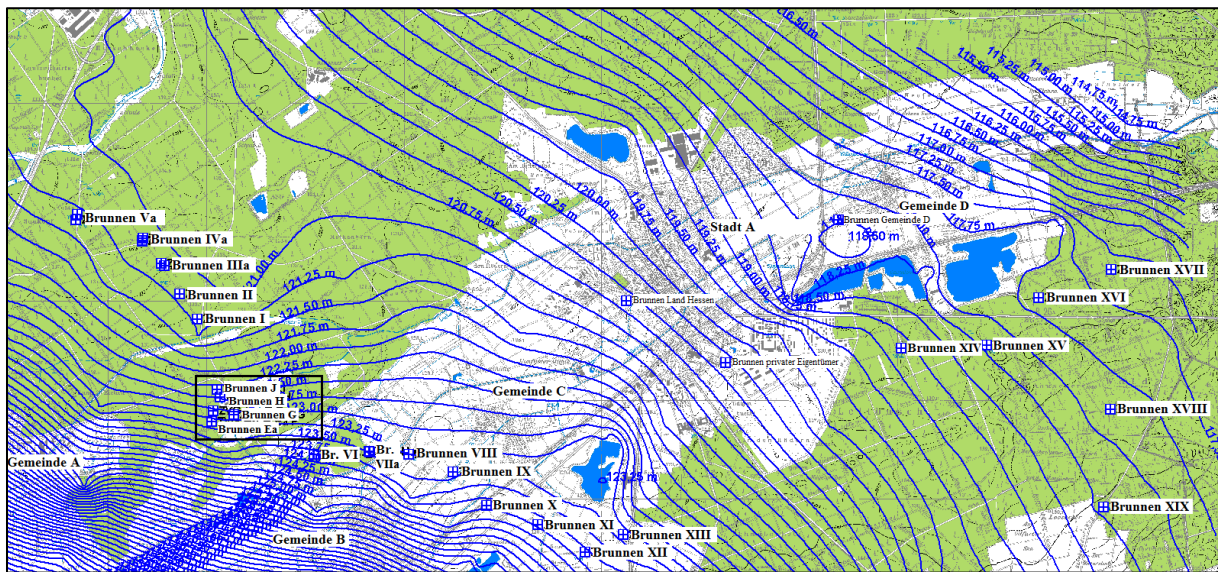


Abbildung 6: Grundwassergleichenplan im Bereich des Wasserwerks A

2.2.1 Grundwasserchemie

Im Hinblick auf die Grundwasserchemie gibt es verschiedene Auswertungsmöglichkeiten. Das Piper-Diagramm stellt eine graphische Auswertungsart der Wasserchemie dar, indem die enthaltenen grundlegenden Anionen und Kationen in ein Verhältnis zueinander gesetzt werden. Von Relevanz sind dabei die Kationen von Magnesium (Mg^{2+}), Calcium (Ca^{2+}), Natrium (Na^+) und Kalium (K^+) sowie die Anionen Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-), Sulfat (SO_4^{2-}), Carbonat (CO_3^{2-}) und Hydrogencarbonat (HCO_3^-). Die jeweiligen Gehalte sind dabei in Prozent angegeben. Das Diagramm besteht aus einem Anionen- und einem Kationendreieck die mit einem Viereck-Diagramm kombiniert werden. Das Viereck-Diagramm ist dabei noch in einzelne Bereiche aufgeteilt, die jeweils mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet sind. Durch diese Einteilung lässt sich das Wasser hinsichtlich der enthaltenen Ionen nach Furtak & Langguth klassifizieren.

In der folgenden Abbildung 7 ist die Rohwasserbeschaffenheit der Brunnen hinsichtlich der enthaltenen Ionen mittels eines Piper-Diagramms dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Rohwässer in Bezug auf die untersuchten Kationen relativ homogene Gehalte aufweisen. Die Konzentrationen der Anionen hingegen unterscheiden sich teilweise voneinander, wobei dennoch einige Brunnen gleiche Gehalte aufweisen und sich dadurch im Diagramm ein Punkthaufen bildet.

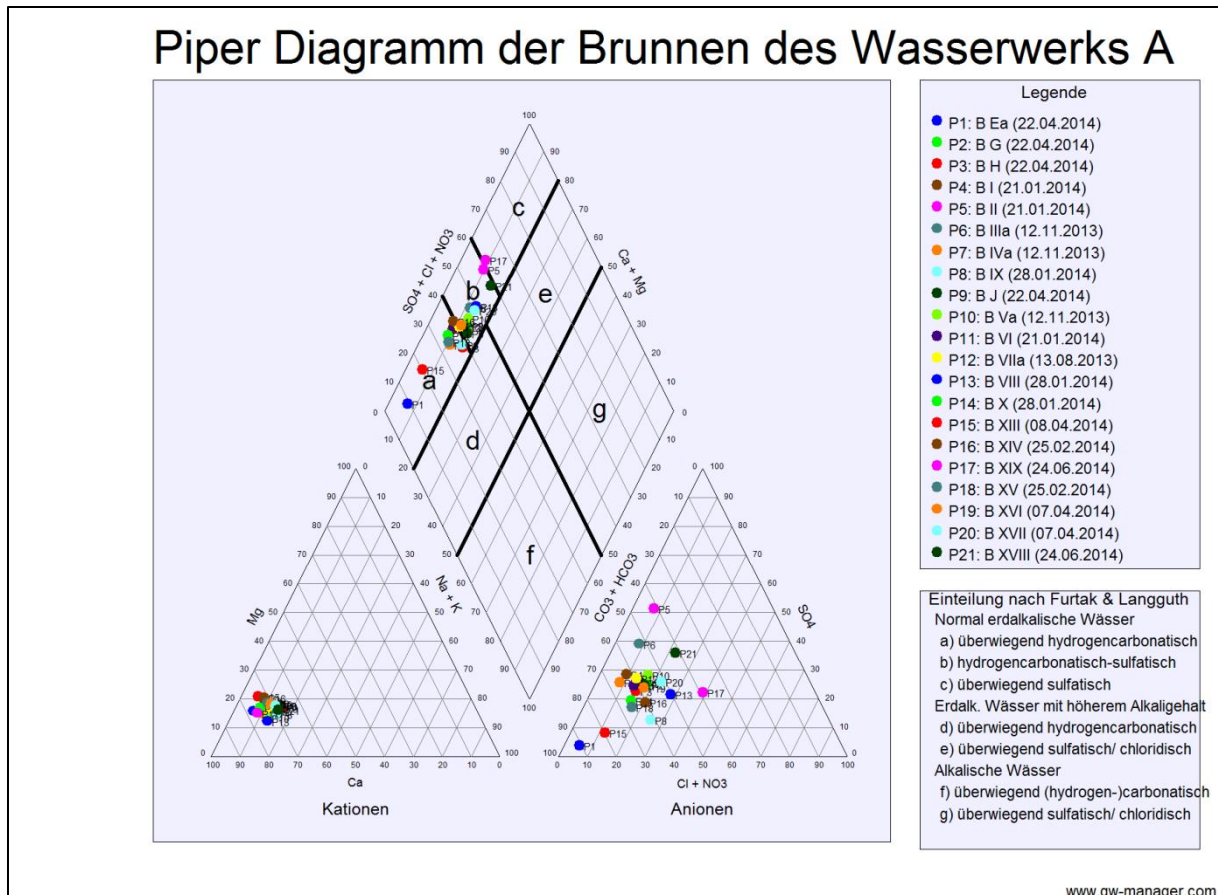


Abbildung 7: Darstellung der Wasserchemie der Brunnen anhand eines Piper-Diagramms

Nach der Einteilung von Furtak & Langguth liegt im Bereich des Wasserwerks A ein normal erdalkalisches Wasser vor, welches überwiegend hydrogencarbonatisch und hydrogencarbonatisch-sulfatisch ist. Das Wasser des Brunnens XIX liegt darüber hinaus an der Grenze zu einem überwiegend sulfatischen Wasser.

Eine weitere graphische Darstellungsart der Wasserchemie stellt das Schöller-Diagramm dar. Dabei werden die Äquivalenzkonzentrationen (mmol(eq)/l) mittels einer logarithmischen Skalierung dargestellt. Im Gegensatz zum Piper-Diagramm wird hierbei auf die Anionen Nitrat und Carbonat kein Bezug genommen. Bei dieser Darstellung weisen parallel verlaufende Kurven auf eine gleiche Ionenverteilung hin.

Mit der nachfolgenden Abbildung 8 ist für alle Brunnen ein Schöller-Diagramm gegeben. Wie bereits mittels des Piper-Diagramms erkennbar, so zeigt auch dieses Diagramm, dass sich das Rohwasser der jeweiligen Brunnen hinsichtlich der Konzentrationen der Kationen des Natriums, Kaliums, Calciums und Magnesiums sehr ähneln, was durch die relativ parallel verlaufenden Kurven ersichtlich ist. In Bezug auf die Anionen sind unterschiedliche Ionenverteilungen erkennbar. Dies ist durch die nicht mehr parallel verlaufenden Kurven zu erkennen, die sich vermehrt kreuzen.

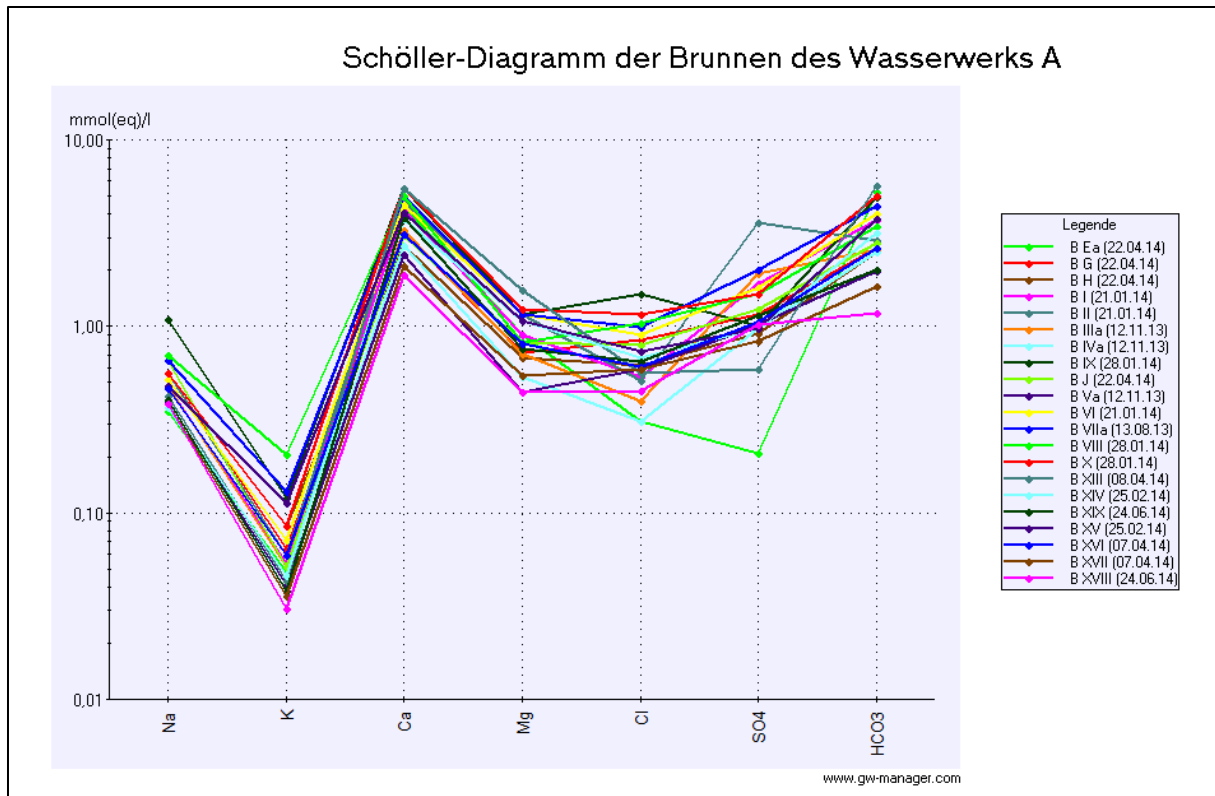


Abbildung 8: Darstellung der Wasserchemie der Brunnen mittels eines Schöller-Diagramms

2.2.2 Einteilung nach O₂-, NO₃-, Fe- und Mn-Gehalt

Im weiteren Hinblick auf die Gehalte an Sauerstoff, Nitrat, Eisen und Mangan können die Brunnen in zwei unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden. Die Rohwasserbeschaffenheit der ersten Gruppe zeichnet sich durch einen sehr geringen Sauerstoffgehalt und damit korrelierend relativ hohe Eisen- und Mangangehalte aus. Bei größeren Sauerstoffkonzentrationen würden die gelösten Eisen- und Manganverbindungen im Wasser zu unlöslichen Verbindungen oxidieren. Es herrschen daher bei dieser Gruppe reduzierende Bedingungen, die durch die bereits erwähnte Deckschicht im Bereich der betreffenden Brunnen zustande kommt. Durch diese Deckschicht ist ein ungehinderter Stoffaustausch zwischen dem Grundwasser und der Oberfläche unmöglich. Dadurch werden auch anthropogen verursachte hohe Nitratgehalte, die im Bereich des Wasserwerks A erstrangig durch eine intensive landwirtschaftliche Nutzung entstehen, vermieden. Die Deckschicht sorgt darüber hinaus dafür, dass das Grundwasser gespannt ist, sich also die Grundwasserdruckfläche oberhalb der Grundwasseroberfläche befindet.

Die zweite Gruppe zeichnet sich durch vergleichsweise hohe Sauerstoffgehalte sowie relativ hohe Nitratgehalte aus. Dies ist vorwiegend in der fehlenden Deckschicht begründet. Dadurch ist ein relativ ungehinderter Stoffaustausch mit der Oberfläche möglich. Aufgrund des verfügbaren Sauerstoffs liegen oxidierende Bedingungen vor. Dies führt zu unlöslichen Eisen- und Manganverbindungen und damit auch zu einem sehr geringen Gehalt an Eisen und Mangan im Wasser, der unter Umständen auch unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt. Des Weiteren ist der Grundwasserkörper bei dieser Gruppe in einem ungespannten Zustand, wodurch sich eine freie Grundwasseroberfläche ergibt.

In Tabelle 15 und Tabelle 16 der Anlage B sind die aktuellen Analyseergebnisse der einzelnen Brunnen aufgelistet, womit die nachfolgenden Zusammenhänge im Hinblick auf die Wasserinhaltsstoffe nachvollzogen werden können.

Infolge der gegebenen Inhaltsstoffe der jeweiligen Rohwässer lassen sich die Brunnen I-VIIa, sowie die Brunnen Ea, G, H und J der ersten Gruppe zuweisen, wobei in dem Bereich dieser Brunnen die für die Wasserinhaltsstoffe mitverantwortliche Deckschicht nachgewiesen wurde.

Ausgenommen des Brunnens X können die restlichen Brunnen der zweiten Gruppe zugeordnet werden, da diese unter anderem teilweise sehr hohe Nitratwerte aufzeigen, hingegen aber die Eisen- und Mangangehalte unter der Bestimmungsgrenze liegen. Dabei können im Falle der Brunnen XIV-XIX diese Werte auf die fehlende Deckschicht zurückgeführt werden. Im Falle des Brunnens XIII liegt zwar eine Deckschicht vor, dennoch liegen die Werte betreffend des Eisens und Mangans unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze.

Im Hinblick auf die Brunnen VIII und IX können die hohen Sauerstoffgehalte aufgrund des hydraulischen Fensters bei Brunnen VIII erklärt werden, wodurch der Zustrom erstrangig aus dem oberen Grundwasserstockwerk erfolgt. Um dies allerdings mit Bestimmtheit sagen zu können, sollte der Zusammenhang weiter überprüft werden.

Obwohl im Bereich des Brunnens X keine Deckschicht vorhanden ist, ist er aufgrund seiner Rohwasserbeschaffenheit der ersten Gruppe zuzuweisen. Dies kann damit erklärt werden, dass das Wasser nur aus dem zweiten Stockwerk gefördert wird und damit die vorhandene Trennschicht für die reduzierenden Bedingungen sorgt.

2.3 Brunnenkennwerte

Die meisten Brunnen des Wasserwerks A wurden in den 1970er Jahren erschlossen, wobei die Brunnen II, E, H und VI von 1975, die Brunnen III, V, J, VII-X und XIII von 1976 und die Brunnen XIV-XVII von 1978 stammen. Lediglich die Brunnen I und IV sind bereits 1967 erbaut worden. Später kamen schließlich die Brunnen XVIII und XIX, beide 1981 errichtet, sowie der Brunnen G (1998) hinzu.

Im Laufe der Jahre kam es zu Sanierungen an den Brunnen III-V, die ab 2006 wieder in Betrieb genommen wurden, sowie an den Brunnen E und VII, die 2013 wieder in Betrieb genommen wurden. Mit der Sanierung änderte sich rein formell auch die Bezeichnung der Brunnen, die mittels eines kleinen „a“ gekennzeichnet ist. So wird beispielsweise der sanierte Brunnen III mit IIIa bezeichnet. Im Verlauf der Sanierung wurde dabei ebenfalls die Pumpe der Brunnen erneuert und durch eine drehzahlgeregelte Pumpe ersetzt. Dies ist im Hinblick auf die Szenarienbetrachtung von Relevanz, da dadurch auf eine optimale Verteilung der Fördermengen zu achten ist, damit es nicht zu vermeidbaren Energieverlusten kommt.

Die Bohrtiefe der einzelnen Brunnen hängt von den jeweiligen geologischen Gegebenheiten ab. Folglich ist auch die Pumpe zur Wasserförderung in unterschiedlichen Tiefen angeordnet und liegt somit zwischen 14 und 31,7 muGOK.

Die maximale Fördermenge der Brunnen ist ebenfalls unterschiedlich und ist dabei auf die jeweilige Ergiebigkeit des Brunnens zurückzuführen. Die geringste Fördermenge weist der Brunnen II mit 20 m³/h auf. Der Brunnen XVII hingegen verfügt über eine maximale Fördermenge von 160 m³/h.

Eine genaue Auflistung der jeweiligen Fördermengen, Förderhöhen sowie der Leistung der Pumpen ist mit Tabelle 14 der Anlage A gegeben.

2.4 Betrieb der Brunnen

Durch Sanierungen an bestimmten Brunnen sind diese zeitweise nicht in Betrieb, sodass es dadurch zu veränderten Förderraten kommt, die durch erhöhte Wasserförderung anderer Brunnen kompensiert wird.

Infolge der Sanierung des Brunnens E durch Neubohrung ist dieser (Ea) erst wieder seit Anfang 2014 in Betrieb genommen worden, sodass im Verhältnis zu den anderen Brunnen dahingehend weniger Wasseranalyseergebnisse in Bezug auf die noch folgende zeitliche Betrachtung des Nitrats vorhanden sind. Gleiches gilt für den Brunnen VIIa, der nach einer Sanierung wieder seit Sommer 2013 in Betrieb ist. Da sich die betreffenden Brunnen allerdings in unmittelbarer Nähe zu den Vorgängerbrunnen befinden, kann auf die Analyseergebnisse der ehemaligen Brunnen zurückgegriffen werden, um etwaige Veränderungen der Rohwasserbeschaffenheit erkennen zu können.

Bei der Bohrung für den Brunnen XIX verlief diese wegen eines Messfehlers nicht genau lotrecht, was zu Problemen bei dem Einbau der Steigleitung führte. Das OBO-Kunstharzpressholz, welches als Brunnenausbaumaterial damals verwendet wurde, wurde mit nicht verzinkten Schrauben fixiert, die mittlerweile zum Teil gravierend korrodiert sind. Dahingehend wird in Erwägung gezogen, eine Einschub-Verrohrung einzusetzen. Aufgrund der aufgetretenen Probleme bei der Steuerung der Pumpe des Brunnens XIX wurde seine Fördermenge reduziert und seit Anfang 2011 auf ein Minimum zurückgesetzt. Lediglich in Spitzenlastfällen wird der Brunnen zur Bedarfsdeckung eingesetzt.

Bedingt durch das hydraulische Fenster und dessen negative Folgen in Bezug auf die Rohwasserbeschaffenheit wird für den Brunnen VIII ein neuer Standort gesucht. Dabei liegt der momentane Nitratwert bei etwa 60 mg/l (vgl. Anlage B, Tabelle 15), wobei in der Vergangenheit auch Werte von etwa 80 mg/l nachgewiesen wurden. Er wird jedoch vorübergehend weiterhin zur Deckung des Wasserbedarfs uneingeschränkt genutzt.

Aufgrund des Wasserbedarfs und der daraufhin geförderten Wassermengen ergeben sich die in Tabelle 1 aufgelisteten Fördermengen. Dabei wurden von den monatlichen Fördermengen der Jahre 2010-2014 die jeweiligen Mittel gebildet, sodass sich die dargestellten Fördermengen als Durchschnitt über fünf, beziehungsweise vier Jahre ergeben.

Monat	Fördermenge [m³/Monat]	Monat	Fördermenge [m³/Monat]
Januar	522.273	Juli	598.005
Februar	509.069	August	581.157
März	540.582	September	538.836
April	559.058	Oktober	534.180
Mai	597.883	November	526.603
Juni	561.374	Dezember	520.118

Tabelle 1: Durchschnittliche monatliche Fördermengen von 2010-2014

Es zeigt sich, dass durchschnittlich im Mai und Juli das meiste Wasser gefördert wird und sich somit eine Menge von etwa 600.000 m³ pro Monat ergibt. Der Februar stellt mit etwa 510.000 m³/Monat den Zeitraum der geringsten Fördermenge dar.

2.5 Rohwasseruntersuchungen

2.5.1 Gesetzliche Grundlagen

In der Rohwasseruntersuchungsverordnung (RUV) ist festgelegt, dass die Wasserversorgungsunternehmen das geförderte Rohwasser in bestimmten Zeitabständen zu untersuchen haben (vgl. §1, RUV). Dabei muss das Wasser hinsichtlich des Nitratwertes vier Mal in einem Jahr mit einem zeitlichen Abstand von etwa 3 Monaten untersucht werden (vgl. §3 Satz 1, RUV) und in jährlichen Abständen hinsichtlich aller anderen Parameter (vgl. §3 Satz 2 und §, RUV).

In der Anlage der RUV sind die Parameter aufgelistet, auf deren Inhalt das Rohwasser jedes Brunnens geprüft werden muss. Diese werden unterteilt in Feldmessungen, zum Beispiel Trübung, Färbung oder Geruch des geförderten Wassers und in Laboruntersuchungen, bei denen beispielsweise der Nitrat- sowie der Calciumgehalt festgestellt wird.

Im Staatsanzeiger für das Land Hessen wurde am 27. November 1995 die Neufassung der Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Rohwasseruntersuchungsverordnung veröffentlicht, in der unter anderem eine Auflistung von 23 Pflanzenschutzmitteln gegeben ist. Auf diese 23 Parameter ist das Rohwasser einmal jährlich zu untersuchen (vgl. §3 Satz 1, RUV).

Durch die RUV werden keine Grenzwerte für die Gehalte des Rohwassers gegeben, da bei Verwendung des geförderten Wassers als Trinkwasser schließlich die Trinkwasserverordnung mit ihren Grenzwerten und Anforderungen greift.

Auch DIN 2000 fordert eine regelmäßige Wasseruntersuchung, die zur Eingangskontrolle dient, einen wichtigen Teil des Gewässerschutzes darstellt und deren Ergebnisse maßgebend für eine Aufbereitung sind.

2.5.2 Aktuelle Rohwasseruntersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen der RUV der einzelnen Brunnen sind unter Anlage B tabellarisch aufgelistet. Dabei wurden im August 2014 die verfügbaren Untersuchungsergebnisse aus der verwendeten Grundwasserbewirtschaftungssoftware (GW-Manager, envi-systems GmbH) eingeholt.

Je nach gewählter Analysemethode kann es dazu kommen, dass der Gehalt des untersuchten Parameters unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt und dadurch dessen genaue Konzentration nicht angegeben werden kann. Dabei kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob der untersuchte Stoff nicht vorhanden ist oder nur in geringen Mengen. Vom jeweiligen Labor ist abhängig, welche Analysemethode gewählt wird und damit auch bei welchem Wert die Bestimmungsgrenze liegt. Dies kann durch Beauftragung unterschiedlicher Labore dazu führen, dass in Bezug auf Nitrat einmal ein Wert von 0,5 mg/l nachgewiesen wird und darauffolgend ein Wert von < 1 mg/l.

Ebenso kann es bei Messungen zu Fehlern kommen. Beispielsweise können unter Umständen Proben durch falsche Beschriftung vertauscht werden oder schlicht die Brunnen verwechselt werden. Dies

kann im Vergleich zu den vorherigen Proben zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen führen. Bei dem Eintragen der Ergebnisse in Tabellen oder speziellen computergestützten Datenhaltungssystemen kann es zu falschen Einträgen durch Vertippen oder Zahlendrehern kommen. Durch eine Plausibilitätsprüfung, bei der man im einfachsten Fall die Werte mit den vorhergegangenen Werten vergleicht und auf ihre Glaubwürdigkeit überprüft, können mögliche Ausreißer identifiziert werden. Allerdings ist diese Aussage nicht immer leicht zu treffen, da für die Konzentration eines Stoffes im Grundwasser mehrere Parameter verantwortlich sind und daher eine Konzentrationsänderung zum Teil durch relativ komplexe Randbedingungen bestimmt wird.

Verglichen mit den Anforderungen der Trinkwasserverordnung für Eisen ($< 0,200 \text{ mg/l}$) und Mangan ($< 0,050 \text{ mg/l}$) liegen die Werte des Rohwassers der Brunnen I-VIIa, X, Ea, G, H und J oberhalb dieser. Dabei weist beispielsweise der Brunnen VI einen Mangangehalt von $1,21 \text{ mg/l}$ auf (vgl. Anhang B, Tabelle 15). Da das geförderte Wasser jedoch noch miteinander vermischt sowie diesbezüglich einer Aufbereitung unterzogen wird, sind die Werte für Mangan und Eisen der Rohwasseruntersuchungen nicht maßgebend für die Trinkwasserqualität.

Die Gehalte des Nitrats der Brunnen I-VIIa und der Brunnen Ea, G, H und J liegen unterhalb von 1 mg/l . Lediglich die Nitratwerte des Brunnens VIII (55 mg/l) und XIX (85 mg/l) liegen oberhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von 50 mg/l . Da eine Entfernung des Nitrats sehr aufwendig, beziehungsweise mit hohen Kosten verbunden ist, wird durch eine optimale Vermischung der einzelnen Rohwässer der Brunnen ein Nitratwert unterhalb des Grenzwertes erreicht. Dabei wird eine größtmögliche Reduktion des Gesamtnitratwertes angestrebt, wobei das Wasserwerk A generell einen Wert unter 25 mg/l einhalten will.

Bezüglich der Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel gibt es zwei maßgebliche Grenzwerte. Zum einen liegt der Grenzwert einzelner PSM bei $0,10 \text{ µg/l}$ und zum anderen der Grenzwert für die Summe der Pflanzenschutzmittel, im Folgenden als $\sum \text{PSM}$ bezeichnet, bei $0,50 \text{ µg/l}$. Die Werte der Brunnen bezüglich beider Grenzwerte liegen unterhalb dieser, wodurch auch beim gemischten Rohwasser keine Grenzwertüberschreitung zu befürchten ist. Jedoch achtet das Wasserwerk A generell darauf, dass der Wert möglichst gering gehalten wird.

Die Ergebnisse aller anderen Parameter liegen in unbedenklichen Konzentrationen vor und müssen daher nicht gesondert betrachtet werden.

2.6 Regelung der Brunnenfördermengen

Um den täglichen Bedarf an Trinkwasser decken zu können, werden manuell zwei bestimmte Einschaltreihenfolgen erstellt, die sich in einer wöchentlichen Taktung für den Verlauf eines Jahres abwechseln. Dabei sind sieben ständig aktive Brunnen für eine Grundlast von $590 \text{ m}^3/\text{h}$ verantwortlich und sechs weitere Brunnen für eine Spitzenlast von $1095 \text{ m}^3/\text{h}$. Diese Bedarfswerte wurden durch die Betrachtung des stündlichen Bedarfs über einige Jahre ermittelt. Dabei haben sich diese Werte im Betrieb der letzten Jahre als reale und dadurch gute Berechnungsgrundlage erwiesen. Die erstellten Reihenfolgen werden in dem computergestützten Leitsystem des Wasserwerks hinterlegt. Ein Schwimmer im Reinwasserbehälter kontrolliert zu bestimmten Zeitintervallen den Wasserstand, wonach automatisch Brunnen nach der erstellten Reihenfolge zur Gesamtförderung zugeschaltet oder außer Betrieb genommen werden.

Grundlage für die einzelnen Einschaltreihenfolgen sind dabei die für das gemischte Rohwasser entstehenden Konzentrationen bezüglich Nitrat, Clofibrinsäure, Eisen, Mangan, Σ PSM und die Gesamthärte. Auch wenn laut Trinkwasserverordnung der Grenzwert für Nitrat mit 50 mg/l festgelegt ist, strebt das Wasserwerk A einen Nitratwert im Reinwasser und damit auch im gemischten Rohwasser der Brunnen von unter 25 mg/l an.

Ebenso spielt die Anordnung der jeweiligen Brunnen bezüglich der Sammelleitung eine Rolle, da darauf geachtet wird, dass die Brunnen am Ende einer Leitung jede Woche und damit in beiden Reihenfolgen berücksichtigt werden. Damit werden Stagnationen des Wassers in Rohrabschnitten vermieden, da sich die Wasserbeschaffenheit dadurch negativ verändern kann. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass die Brunnen IIIa-Va durch die Sanierung eine höhere Ergiebigkeit und damit auch höhere maximale Fördermenge aufweisen als angenommen. Dadurch können diese aufgrund des vorhandenen Leitungssystems nicht gleichzeitig unter Vollast laufen, da damit ein hoher Energieverlust verbunden ist. Das bedeutet, dass in einer Reihenfolge nur zwei dieser Brunnen betrachtet werden können.

Mit der Tabelle 2 sind die beiden aktuellen Einschaltreihenfolgen gegeben, die vom Oktober 2013 stammen. Die Darstellung der Tabelle orientiert sich dabei an der im Wasserwerk A dafür üblichen Art. Für jede Reihenfolge stehen zwei Spalten zur Verfügung, wodurch sich vier Spalten ergeben. Oberhalb der jeweiligen Spalten sind die Kalenderwochen eingetragen, zu denen die betreffende Reihenfolge wirksam ist. Die Brunnenzahlen werden hierbei mittels arabischer Zahlen dargestellt.

Kalenderwochen			
06 10 14 18 22	07 11 15 19 23	08 12 16 20 24	09 13 17 21 25
26 30 34 38 42	27 31 35 39 43	28 32 36 40 44	29 33 37 41 45
46 50 02 06	47 51 3	48 52 04	49 01 05
Brunnen	Brunnen	Brunnen	Brunnen
2	1	2	1
7a	15	7a	15
16	6	16	6
5a	4a	5a	4a
14	18	14	18
3a	10	3a	10
10	16	10	16
18	H	18	H
8	5a	8	5a
17	13	17	13
Ea	2	Ea	2
13	G	13	G
J	9	J	9

Tabelle 2: Einschaltreihenfolge der Brunnen

In Tabelle 2 sind die sieben ständig aktiven Brunnen in Bezug auf die Grundlast blau unterlegt, wohingegen die sechs folgenden Brunnen zur Spitzenlastdeckung rot markiert sind.

Es fällt auf, dass die Brunnen Ea, G, H und J bei beiden Einschaltreihenfolgen nur während der Spitzenlast eingesetzt werden. Dies ist auf die enthaltenen relativ hohen Werte der Clofibrinsäure zurückzuführen (siehe auch 3.4.2. Clofibrinsäurenachweis in den Brunnen des Wasserwerks A).

Der Grund dafür, dass Brunnen XIII sowie Brunnen Va und XVIII in beiden Reihenfolgen vorkommen liegt darin, dass diese Brunnen am Ende der jeweiligen Sammelleitungen angeordnet sind und daher aus den bereits erwähnten Gründen regelmäßig betrieben werden.

Es sei erwähnt, dass zur Erstellung der momentanen Einschaltreihenfolge abweichende Analyseergebnisse im Vergleich mit den in dieser Arbeit gegebenen vorhanden waren, sodass unter Betrachtung der aktuellen Werte sich unter Umständen andere Reihenfolgen ergeben würden.

2.7 Wasseraufbereitung

Infolge der relativ hohen Eisen- sowie Mangangehalte, die durch die Rohwasserbeschaffenheit der Brunnen I-VIIa und Ea, G, H und J zustande kommen, ist eine Aufbereitung des vom Wasserwerk A geförderten Wassers notwendig. Dabei wird das gesamte geförderte Wasser vor der Aufbereitung zusammengeführt und somit auch komplett einer Aufbereitung unterzogen, auch wenn beispielsweise die Rohwässer der Brunnen XIV-XIX in Bezug auf Eisen und Mangan keine Aufbereitung benötigen würden.

Parallel zur Enteisung und Entmanganung wird das Wasser hinsichtlich der enthaltenen Kohlensäure behandelt, die zwar geschmacklich von Vorteil ist, jedoch in Form von Korrosion die metallischen Werkstoffe beeinträchtigt.

Die Wahl einer geeigneten Aufbereitung ist dabei von Menge und Form (Bindungsart) des Eisens bzw. des Mangans abhängig. Bei dem gegebenen Rohwasser treten aufgrund des geringen Sauerstoffgehalts der betreffenden Wässer die beiden Elemente hauptsächlich in der zweiwertigen Form Eisen(II) und Mangan(II) auf. Auf dieser Grundlage ist eine geeignete Aufbereitung mittels einer Ausfällung durch Belüftung und anschließender biologischer Enteisung und Entmanganung gewählt worden.

Mittels einer Kaskadenbelüftung wird in das Wasser gefilterte Luft eingeblasen. Das Rohwasser fällt dabei aus einer Höhe von etwa fünf Metern von Kaskadenkasten zu Kaskadenkasten und nimmt Sauerstoff auf, wodurch ein Teil der aggressiven Kohlensäure (H_2CO_3) als Kohlenstoffdioxid (CO_2), sowie Schwefelwasserstoff (H_2S) ausgetrieben werden. Durch das Einblasen von gefilterter Luft wird Eisen(II) und Mangan(II) zu Eisen(III) und Mangan(III) oxidiert.

Das Wasserwerk A verfügt über neun Kaskadenräume, wobei jeweils drei dieser Räume eine Anlagengruppe bilden. Jeder Kaskadenraum weist einen Radial-Ventilator auf, der eine Luftmenge von 12.000 m³/h einbringen kann. Pro Kaskadenraum beträgt die Durchsatzmenge an Rohwasser 200 m³/h, wodurch sich insgesamt eine maximale Durchsatzmenge von 1800 m³/h ergibt.

Das herabfallende Wasser wird in einem Reaktionsbecken aufgefangen, wo sich bereits ausgefällte Eisen- und Manganpartikel auf dem Beckenboden absetzen. Jedes Becken fast 50 m³. Dies führt bei insgesamt neun Becken zu einem Gesamtvolumen von 450 m³.

Da jedoch alleine durch die Belüftung eine ausreichende Aufbereitung nicht gewährleistet ist und sich darüber hinaus Schwebeteilchen im Wasser befinden, wird das Wasser anschließend mit Hilfe von

Pumpen über Kiesfilter geleitet. Die Pumpen sind dabei drehzahlregelt und können jeweils maximal 200 m³/h befördern. In den Filterkesseln findet zum einen ein Abfangen von Eisen- und Manganfeststoffen statt, die sich bereits durch den Eintrag von Sauerstoff während der Belüftung gebildet haben und zum anderen eine biologische Enteisung und Entmanganung. Dabei wird durch sessile eisen- bzw. manganoxidierende Bakterien, die sich am Filtermaterial ansammeln und um die einzelnen Filterkörner einen Biofilm bilden, eine weitgehende Aufbereitung ermöglicht. Wie bereits bei der Belüftung entstehen so Feststoffpartikel, die mittels des Filterkieses abfiltriert werden.

Für die biologische Aufbereitung ist dabei auf einen ausreichenden Sauerstoffgehalt des Wassers zu achten, der mittels der Kaskadenbelüftung gewährleistet ist. Darüber hinaus ist ein pH-Wert von 7,4 optimal für die Mikroorganismen und damit für den biologischen Abbau des Eisens und Mangans. Daraufhin wurde die Belüftung optimal eingestellt, sodass, von gelegentlichen Schwankungen abgesehen, der pH-Wert relativ konstant gehalten wird.

Die Mikroorganismen benötigen Eisen und Mangan unter anderem, um ihre Stoffwechselaktivität aufrecht zu erhalten, sodass in den nachfolgenden Szenarien bei der Fördermengenregelung darauf geachtet wird, einen Eisengehalt von 1,5 mg/l und einen Mangangehalt von 0,15 mg/l nicht zu unterschreiten. Generell sollten die Gehalte an Eisen und Mangan nicht zu sehr schwanken, damit eine ausreichende biologische Reinigung gewährleistet werden kann.

Die neun Filterkessel sind als Schnellfilter ausgelegt worden und haben eine zylinderförmige Geometrie. Der Durchmesser liegt bei 4,5 m, wodurch jeweils ein Volumen von 69 m³ zustande kommt. Bei einem Volumenstrom von 200 m³/h und einer Kesseloberfläche von etwa 16 m² folgt eine Filtergeschwindigkeit von 12,5 m/h.

Mittels einer Differenzdruckmessung wurde eine Zeit von 80 Stunden bestimmt, nach der die einzelnen Filterkessel rückgespült werden müssen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Feststoffpartikel die Filter belegen und sich dadurch der Filterwiderstand erhöht, was zu einer Erhöhung des Energiebedarfs führt. Durch eine Druckerhöhung steigt dabei auch die Menge an Feststoffen, die den Filter ungehindert passieren und damit auch die unerwünschte Trübung des Reinwassers sowie die Menge an ausgewaschenen Bakterien. Im Hinblick auf die Laufzeit des Filters muss daher ein Zeitraum gefunden werden, der ein optimales Verhältnis zwischen längst möglicher Betriebsdauer und größtmöglicher Filterwirkung ermöglicht.

Die Rückspülung erfolgt mittels eines Wasser-Luft-Gemisches. Dabei ist auf eine geeignete Spüldauer zu achten, da die Filter optimal von den Feststoffen befreit werden sollen, jedoch der Biofilm erhalten bleiben muss, um eine ausreichende Aufbereitung des Wassers nach der Spülung gewährleisten zu können.

Durch die Oxidation von Mangan(II) und Eisen(II) kommt es auf Grund entstehender Wasserstoffionen, die sich als Produkt der jeweiligen Reaktionen bilden, zu einer Abnahme des pH-Wertes. Deshalb kann es trotz einer unbedenklichen Rohwasserbeschaffenheit bezüglich des pH-Wertes vor der Aufbereitung erforderlich sein, eine Entsäuerung nach der Enteisung und Entmanganung durchzuführen. Daher ist jedem Enteisungs- und Entmanganungsfilter ein Entsäuerungsfilter nachgeschaltet, der gesondert rückgespült werden muss.

Für jede Ausbaustufe sind zwei Absetzbecken vorhanden, bei denen der Schlamm vom Wasser annähernd getrennt wird. Der Schlamm wird auf Trockenbeete gepumpt und weist einen Eisengehalt

von ungefähr 130 g/kg Trockenmasse auf. Einmal jährlich werden so ca. 200 Tonnen Schlamm zur Weiterverwertung abtransportiert.

2.8 Wasserrechtliche Rahmenbedingungen

Generell ist das Vorhaben einer Grundwasserentnahme bei den zuständigen Behörden zu beantragen, die die Entnahme genehmigen müssen. Bei einer Entnahme über einen längeren Zeitraum, wie im Falle eines Brunnens, wird von der jeweiligen Behörde ein Bescheid erteilt, in dem festgelegt ist, wie viel Kubikmeter gefördert werden dürfen. Dabei ist meist eine zulässige Menge in Kubikmeter pro Jahr gegeben, die gegebenenfalls durch Angabe einer monatlich, täglich oder stündlich maximalen Fördermenge, die teilweise auch nur für bestimmte Brunnen gelten kann, ergänzt wird. Diese Angabe berücksichtigt unter anderem einen maximalen Flurabstand, welcher nicht überschritten werden darf, damit das vor Ort bestehende Ökosystem nicht gefährdet ist. In solchen Bescheiden werden meist zur Überprüfung der vereinbarten Grenzwerte Überwachungsauflagen festgelegt, die in einem bestimmten zeitlichen Abstand erfüllt werden müssen.

Vom Regierungspräsidium Darmstadt wurde mit dem Bescheid vom 19. Dezember 2008 die Bewilligung erteilt, dass maximal 6,0 Mio. m³/a Grundwasser aus den Brunnen I bis X, XIII, Ea, G, H und J gefördert werden dürfen. Des Weiteren wurden für 28 Messstellen Niedriggrundwasserstände festgelegt. Bei acht dieser Messstellen wurden in Abstimmung mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) Warnwerte festgesetzt. Dabei steht das Wasserwerk A in der Pflicht, die zuständige untere Wasserbehörde umgehend zu informieren, falls an zwei dieser acht Messstellen die Warnwerte erreicht werden.

Mit dem Bescheid für die Brunnen XIV bis XIX vom 29. April 2003 wurde die Genehmigung erteilt, jährlich eine Menge von 3.200.000 m³ für die öffentliche Wasserversorgung zu entnehmen. Ebenso wurden bei diesem Bescheid Grundwasserstände für bestimmte Messstellen festgelegt, die nicht unterschritten werden dürfen. Des Weiteren wurden Auflagen festgesetzt, die zu einem bestimmten Zeitpunkt erfüllt werden müssen. Beispielsweise sind die Betriebs- und Ruhewasserspiegel jedes Brunnens halbjährlich zu dokumentieren.

Bei beiden Bescheiden handelt es sich dabei generell um eine jährliche Beschränkung. Darüber hinaus sind keine Vorgaben in Bezug auf monatliche, tägliche oder stündliche Beschränkungen der Fördermengen sowie keine brunnenspezifischen Einschränkungen gegeben.

3 Gesonderte Betrachtung bestimmter Wasserinhaltsstoffe

3.1 Nitrat

3.1.1 Allgemeines

Wie bereits erwähnt, darf Wasser, welches als Trinkwasser verwendet werden soll, laut Trinkwasserverordnung höchstens 50 mg/l Nitrat enthalten. Dieser Grenzwert ist vorrangig auf Grund der folgenden nicht ausschließbaren gesundheitlichen Gefährdungen von Kleinkindern, der Bildung von Nitrit und Nitrosaminen sowie der Förderung von Korrosion festgelegt worden (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 157). Deshalb wird bereits bei der Standortwahl eines Brunnens darauf geachtet, dass der Nitratgehalt im Grundwasser relativ gering ist. Dabei kann die Nitratbelastung des Grundwassers je nach Lage der Brunnen sehr unterschiedlich sein.

Im Gebiet des Wasserwerks A sind die vorhandenen hohen Nitratwerte auf die intensive landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet zurückzuführen. Dabei ist erfahrungsgemäß die Nitratkonzentration im Bereich des Spargelanbaus, der zum Teil auch im Gebiet des Wasserwerks betrieben wird, im Vergleich mit anderen landwirtschaftlich genutzten Flächen am höchsten (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 158).

Auf die Äcker werden vorwiegend stickstoffhaltige Dünger als auch Gülle aufgebracht. Was die Pflanzen für ihr Wachstum nicht benötigen, macht sich schließlich als erhöhter Nitratgehalt im Grundwasser bemerkbar (vgl. Umweltbundesamt, 2014, www.umweltbundesamt.de). Das führt dazu, dass mittlerweile etwa 50% aller Grundwassermessstellen Deutschlands eine Konzentration von über 10 mg/l aufweisen und 15% einen Wert, der über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung liegt (vgl. Umweltbundesamt, 2014, www.umweltbundesamt.de).

Um den vermehrten Nitratreintrag in das Grundwasser zu unterbinden, arbeitet das Wasserwerk A mit den betreffenden landwirtschaftlichen Betrieben zusammen und klärt unter anderem die Landwirte über eine optimale Düngung und den Sachverhalt in Bezug auf Nitrat auf. Dahingehend finden teilweise auch Ausgleichszahlungen statt, um für eine wasserschonende Bewirtschaftung hinsichtlich der Düngung zu sorgen.

3.1.2 Zeitliche Entwicklung des Nitratgehalts

Betrachtet wird die Entwicklung des Nitratwerts der einzelnen Brunnen in einem Zeitraum von Anfang 2010 bis Frühsommer 2014. Jedoch stehen infolge der Sanierung an Brunnen VIIa und Ea Untersuchungsergebnisse nicht für den gesamten Beobachtungszeitraum zur Verfügung. Dahingehend werden diese mit den Ergebnissen der ehemaligen Brunnen VII und E verglichen.

Die Diagramme, die die Entnahmemenge und den Nitratgehalt der Brunnen des Wasserwerks A aufzeigen, sind in Anlage C zu finden.

Generell sei gesagt, dass ein Zusammenhang zwischen Entnahmemenge und Nitratgehalt nicht immer leicht erkennbar ist bzw. nachgewiesen werden kann, obwohl dies augenscheinlich aufgrund der vorliegenden Diagramme anzunehmen wäre. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass für die Konzentration eines Stoffes im Grundwasser mehrere Parameter verantwortlich sind und daher eine Konzentrationsänderung zum Teil durch relativ komplexe Randbedingungen bestimmt wird.

Unter anderem kann beispielsweise auch die Fördermenge eines benachbarten Brunnens ausschlaggebend für den Nitratgehalt am betrachteten Brunnen sein.

Aus denselben Gründen ist eine Aussage über mögliche Messfehler nur schwer zu treffen. Daher sind die nachfolgenden erwähnten Messfehler bezüglich des Nitratgehalts nur Vermutungen und müssen dahingehend weiter überprüft werden.

Für die Brunnen Ea, G, H und J sowie für die Brunnen I-Va liegt der Nitratgehalt über die gesamten betrachteten Jahre beständig unterhalb von 1 mg/l. Beim Brunnen E waren 2011 über die Dauer von etwa einem Jahr Abweichungen von diesem Wert gegeben, wobei lediglich maximal 2,8 mg/l nachgewiesen wurden. Bezüglich des Brunnens VI wurde im Herbst 2010 der einzige Wert über 1 mg/l gemessen (3 mg/l, vgl. Anlage C, Abbildung 21). Abschließend kann für diese Brunnen kein Zusammenhang zwischen der Fördermenge und dem Nitratwert festgestellt werden (vgl. Anlage C, Abbildung 12-21), sodass in den nachfolgenden Berechnungen und Szenarien ein konstanter Nitratwert von 1 mg/l für diese Brunnen angenommen wird, der darüber hinaus sich mit den aktuellen Nitratwerten dieser Brunnen deckt.

Bei Brunnen H wurde im Herbst 2010 ein Wert von 0,5 mg/l nachgewiesen. Dieser Gehalt kam womöglich aufgrund einer anderen Analysemethode zustande, die eine von 1 mg/l abweichende Bestimmungsgrenze aufweist (vgl. Anlage C, Abbildung 14).

Da der Brunnen VIIa erst seit dem Sommer 2013 in Betrieb ist, liegen relativ wenige Analyseergebnisse vor. Da an gleicher Stelle der alte Brunnen VII lokalisiert war, können dessen Analyseergebnisse für eine weitere Betrachtung herangezogen werden. In Abbildung 22 der Anlage C sind die Entnahmemengen sowie Nitratgehalte beider Brunnen aufgezeigt. Im Spätsommer des Jahres 2011 wurde ein Nitratwert von über 8 mg/l nachgewiesen. Da dieser Wert eine vergleichsweise signifikante Differenz zu dem vorherigen sowie nachfolgenden Wert aufweist, könnte ein Messfehler unterlaufen sein. Im Allgemeinen lässt sich ein Anstieg des Nitratwertes nach Inbetriebnahme des Brunnens VIIa von < 1 mg/l auf etwa 9 mg/l feststellen. Es kann vermutet werden, dass durch die Erhöhung der Fördermenge der Nitratwert gestiegen ist, jedoch kann infolge des im hydrogeologischen Sinne relativ kurzen Überwachungszeitraums von etwa einem Jahr nicht abschließend geklärt werden, ob dies der Grund für den Anstieg der Konzentration ist oder ob andere Bedingungen hierfür verantwortlich sind.

Bei den Brunnen VIII-X und XIII-XIX schwankt der Nitratwert zum Teil sehr stark, wobei lediglich die Gehalte der Brunnen VIII und XIX oberhalb des von der Trinkwasserverordnung festgelegten Grenzwerts von 50 mg/l liegen (vgl. Anlage C, Abbildung 23-32).

Bei dem Brunnen X wurden zu Beginn des betreffenden Zeitraums bis in den Herbst 2011 Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen (vgl. Anlage C, Abbildung 25). Anschließend stieg der Nitratgehalt auf etwa 4,5 mg/l und fiel danach wieder auf 3 mg/l.

Vergleicht man die gemessenen Werte miteinander, so kann man bei dem Brunnen XIV im Sommer 2011 einen um etwa 4 mg/l kleineren Wert, verglichen mit den restlichen gemessenen Werten an diesem Brunnen, erkennen (vgl. Anlage C, Abbildung 27). Bei dem Brunnen XVI ist ebenfalls eine Abweichung des Nitratwertes im Vergleich mit den vorangegangenen sowie nachgehenden Werten erkennbar (vgl. Anlage C, Abbildung 29), wobei diese eine höhere Differenz aufweist als bei Brunnen XIV. Verglichen mit den restlichen Ergebnissen ist der gemessene Wert von Anfang April

2013 doppelt so hoch. Dies kann ein Hinweis auf einen Messfehler sein. Von diesen beiden Abweichungen abgesehen liegt der Nitratgehalt beider Brunnen in einem relativ konstanten Bereich, der bei Brunnen XIV bei einem Wert von 25 mg/l liegt und im Falle des Brunnens XVI bei 11 mg/l.

Am Brunnen XIII kann ein Zusammenhang zwischen Fördermenge und Nitratgehalt vermutet werden, da durch die Verminderung der Fördermenge der Wert des Nitrates ebenfalls gesunken ist. Das heißt, von anfangs etwa 40.000 m³/Monat wurde die Entnahme auf etwa 18.000 m³/Monat reduziert. Im gleichen Zeitraum minimierte sich der Nitratgehalt von ca. 37 mg/l auf ca. 23 mg/l (vgl. Anlage C, Abbildung 26). Um diesen Zusammenhang bestätigen zu können, sollten jedoch die Fördermenge sowie der Nitratgehalt weiterhin beobachtet werden.

Bei dem Brunnen VIII ist im beobachteten Zeitraum ein Rückgang des Nitratgehalts von anfangs etwa 60 mg/l auf 51,7 mg/l festzustellen (vgl. Anlage C, Abbildung 23). Dabei lag die Nitratkonzentration im Zeitraum von 1980 bis 2003 zum Teil deutlich über 70 mg/l und erreichte zweimal (Anfang 1982, Ende 1984) sogar Werte, die leicht oberhalb von 90 mg/l lagen.

Bei den Brunnen IX, XV, XVIII und XIX ist durch die letzten Untersuchungsergebnisse der Trend eines steigenden Nitratwertes zu erkennen, was darauf schließen lässt, dass sich dieser Trend fortsetzen wird. Dabei stieg beispielsweise der Wert des Brunnens IX von anfangs etwa 26 mg/l auf rund 40 mg/l an (vgl. Anlage C, Abbildung 24)..

Seit Frühjahr 2010 wurde die monatliche Fördermenge an Brunnen XIX zurückgefahren. Dabei wurde zuerst ein relativer Rückgang des Nitratgehalts festgestellt. Obwohl seit Anfang 2011 die Förderrate am Brunnen XIX auf einem minimalen Stand gehalten wird, ist wieder eine deutliche Steigerung der Nitratkonzentration zu erkennen, die sogar leicht oberhalb des Wertes vor der Fördermengenreduzierung liegt (vgl. Anlage C, Abbildung 32). Auch wenn der zuerst dokumentierte Rückgang der Konzentration Gegenteiliges vermuten lässt, weist der darauffolgende Anstieg auf einen Standort des Brunnens XIX im Bereich eines Konzentrationsmaximums einer Nitratfahne hin. Dies führt dazu, dass bei der Wasserförderung Wasser geringerer Nitratkonzentrationen angezogen wird und dadurch der Gesamtnitratgehalt im Rohwasser des Brunnens sinkt. Bei stillstehender Förderung steigt der Nitratgehalt langsam bis er schließlich das Maximum der Konzentrationsfahne erreicht hat, da keine Mischung mit geringer haltigem Wasser stattfindet. Diese Vermutung wird mittels der Abbildung 11 unter Punkt 5.1. bestätigt. Der zuerst beobachtete Rückgang des Nitratgehaltes muss daher in anderweitigen Bedingungen seine Ursache haben.

Im Hinblick auf die Szenarienbetrachtung ist der Brunnen XVIII besonders erwähnenswert, da bei diesem ein relativ konstanter Anstieg bis zum Frühjahr 2014 zu beobachten ist. Dabei ist innerhalb von einem Tag (17.03.2014 auf 18.03.2014) der Nitratwert von 12 mg/l auf 21,1 mg/l sprunghaft angestiegen (vgl. Anlage C, Abbildung 31). Dieser relativ hohe Wert wurde am 24.06.2014 mit einem Wert von 21,2 mg/l bestätigt, woraufhin am darauffolgenden Tag ein Wert von 12 mg/l nachgewiesen wurde, der somit im Bereich des Nitratgehalts vor diesem Sprung liegt.

Abgesehen von dem Sprung des Nitratwertes an Brunnen XVIII kann dieser relativ konstante Anstieg mit der Einstellung der Förderung an Brunnen XIX erklärt werden. Wie bereits erwähnt, liegt der Brunnen XIX in einem Konzentrationsmaximum einer Nitratfahne. Da mittlerweile nur noch zu Spitzenbedarfszeiten eine Förderung an diesem Brunnen stattfindet, zieht der Brunnen XVIII aufgrund seiner gestiegenen Fördermenge diese Nitratfahne an, wodurch sich der Nitratgehalt erhöht.

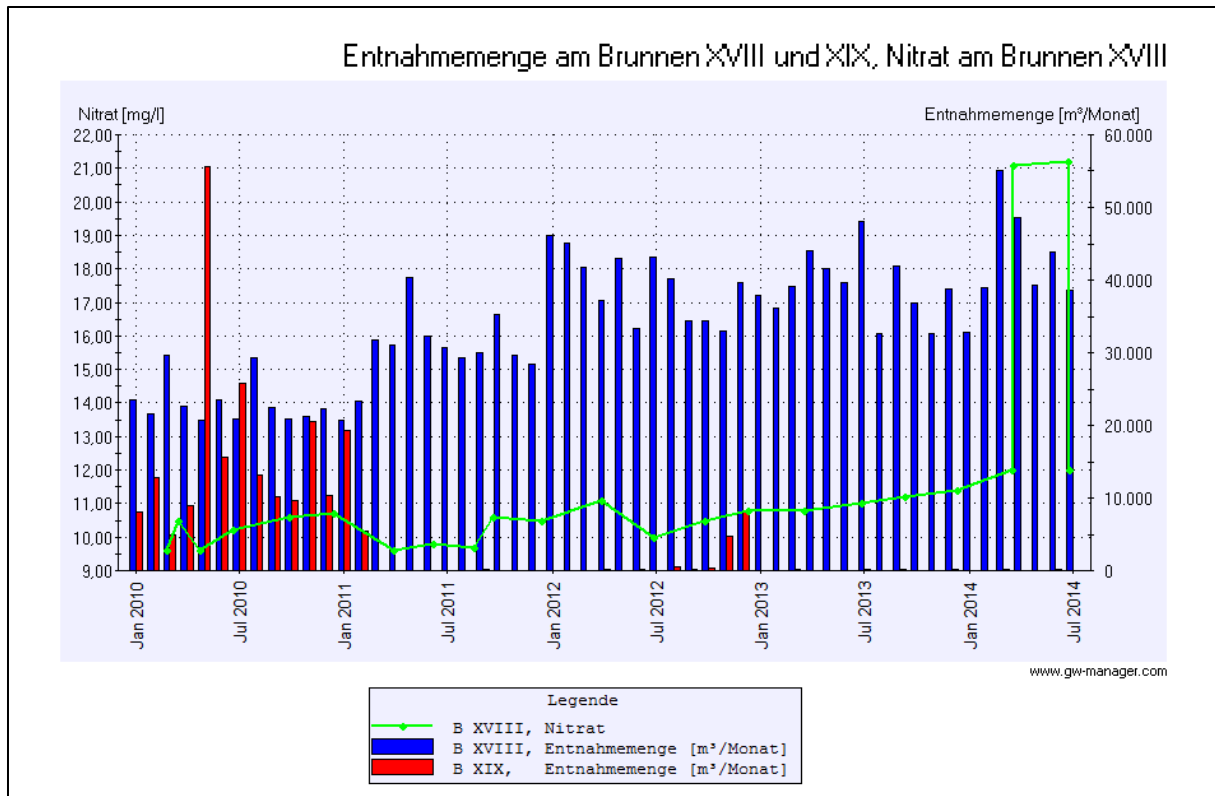


Abbildung 9: Entwicklung des Nitrats an Brunnen XVIII in Bezug auf die Entnahmemenge der Brunnen XVIII und XIX

Um diesen Zusammenhang graphisch zu belegen, wurde in der Abbildung 9 die Entnahmemengen der Brunnen XVIII und XIX mit den gemessenen Nitratwerten des Brunnens XVIII verglichen. Es treten zwar ebenso immer wieder relative Nitratminderungen im zeitlichen Verlauf auf, jedoch ist im Gesamtblick eine Steigerung festzustellen. Daher muss davon ausgegangen werden, dass vor allem im Hinblick auf die größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XVIII der Nitratwert an Brunnen XVIII weiter steigen wird.

Brunnen	Nitratgehalt [mg/l]	Datum	Brunnen	Nitratgehalt [mg/l]	Datum
I	< 1	15.04.2014	VIII	54,7	25.08.2014
II	< 1	15.04.2014	IX	38,9	25.08.2014
IIIa	< 1	12.11.2013	X	3,0	28.01.2014
IVa	< 1	12.11.2013	XIII	21,6	11.08.2014
Va	< 1	12.11.2013	XIV	24,8	05.08.2014
Ea	< 1	22.04.2014	XV	15,2	23.06.2014
G	< 1	22.04.2014	XVI	10,5	23.06.2014
H	< 1	22.04.2014	XVII	8,6	07.04.2014
J	< 1	22.04.2014	XVIII	12,0	24.06.2014
VI	< 1	15.04.2014	XIX	85,0	24.06.2014
VIIa	8,97	23.06.2014			

Tabelle 3: Aktuelle Nitratergebnisse

In der Tabelle 3 sind die aktuellen Nitratwerte inklusive der Daten der Probenahme der einzelnen Brunnen aufgelistet. Man erkennt, dass die Brunnen I-VI sowie die Brunnen Ea, G, H und J eine Konzentration von unter 1 mg/l aufweisen, während bei den übrigen Brunnen die Werte zum Teil stark voneinander abweichen. Mit dem Brunnen XIX wird der maximale Wert, verglichen mit den anderen Brunnen, von 85 mg/l erreicht, der somit 35mg/l über dem Grenzwert der Trinkwasserversorgung liegt. Diese Nitratwerte werden zur weiteren Szenarienbetrachtung verwendet.

3.2 Eisen

Im Grundwasser werden immer wieder Eisengehalte nachgewiesen, da das Eisen in den verschiedenen Bodenschichten vorhanden ist und unter anderem durch Auswaschen in das Grundwasser gelangt. Dabei lässt ein relativ hoher Eisenwert auch Rückschluss auf den Sauerstoffgehalt im Wasser zu, da das Eisen beim Vorhandensein von Sauerstoff mit diesem zu unlöslichen Verbindungen oxidiert und dadurch zu keinem gelösten Eisengehalt im Wasser führt (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 176). Dies ist auch bei den Rohwasseranalysen in Anlage B der Brunnen I-VIIa und der Brunnen Ea, G, H und J zu erkennen, die alle einen relativ hohen Eisengehalt aufweisen, hingegen aber einen sehr geringen bis keinen Sauerstoffgehalt (siehe auch Punkt 2.2.2.).

Im Allgemeinen ist Eisen nicht gesundheitsgefährdend. Durch Eisenschlammablagerungen oder Eisenbakterien kann es jedoch zur Verminderung des Rohrquerschnitts und dadurch auch zu einer verminderten Fördermenge kommen (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 176). Dies führt darüber hinaus zu einem erhöhten hydraulischen Widerstand. Des Weiteren reagiert, wie bereits erwähnt, Eisen in Verbindung mit Luft und es kommt zum Ausflocken gelbbrauner Festteilchen, wodurch das Trinkwasser den Anforderungen der DIN 2000 hinsichtlich des Geschmacks und der Farbe nicht mehr entspricht (vgl. 5.1 Grundanforderungen, DIN 2000). Darüber hinaus verursacht eisenhaltiges Wasser beim Waschen Flecken auf der Kleidung, die von den Verbrauchern nicht erwünscht sind.

Aus diesen technisch sowie gesellschaftlich unerwünschten Gründen ist bereits bei einem Eisengehalt von $> 0,05$ mg/l eine Wasseraufbereitung zu empfehlen (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 176), wobei hingegen die Anforderung bezüglich des Trinkwassers laut Trinkwasserverordnung für Eisen bei 0,200 mg/l liegt.

Die DVGW Arbeitsblätter W 223-1 bis W 223-3 „Enteisenung und Entmanganung; Teil 1-3“ zeigen verschiedene Aufbereitungsverfahren für eine den Umständen angepasste Enteisenung und Entmanganung auf und geben diesbezüglich Informationen und Anforderungen wieder. Dabei empfiehlt das DVGW Arbeitsblatt W 223-1 unter anderem einen Eisengehalt von $\leq 0,02$ mg/l durch eine Aufbereitung anzustreben, da auch schon bei geringen Konzentrationen Ablagerungen entstehen können.

3.3 Mangan

Mangan kommt im Boden unter anderem in Form von Braunstein vor, dabei löst sich das Mangan im Grundwasser durch die Lufteinwirkung infolge von wechselnden Grundwasserständen (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 178). Im Hinblick auf die Eigenschaften bezüglich der Trinkwasserqualität ähnelt es dem Eisen: Es ist ebenso wenig gesundheitsschädlich, führt aber zu Ablagerungen im Rohrnetz, Trübung und Geschmacksveränderung und ist daher insgesamt nicht erwünscht.

Die Anforderung der Trinkwasserverordnung bezüglich des Mangans liegt bei 0,050 mg/l, jedoch wird bereits bei einem niedrigeren Wert von 0,01 mg/l eine Entmanganung empfohlen und durchgeführt (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 247). Dabei empfiehlt das DVGW Arbeitsblatt W 223-1 einen Mangangehalt von $\leq 0,01$ mg/l durch eine Aufbereitung anzustreben.

3.4 Arzneimittel im Grundwasser

Viele Arzneimittelwirkstoffe, die in der Human- und Veterinärmedizin verwendet werden, verlassen zum Teil unverändert den Körper und gelangen somit in das Abwasser (Umweltbundesamt, o. J., www.umweltbundesamt.at). In welchem Umfang dabei die Arzneimittel ausgeschieden werden, ist von dem jeweiligen Wirkstoff abhängig und kann dabei zwischen 1% und > 90% schwanken (Scheytt, 2011, S. 5). Durch die Kanalisation gelangen dann diese Stoffe in die Kläranlagen, wo das Abwasser zwar gereinigt wird, die Arzneimittel jedoch angesichts der vorhandenen Reinigungsstufen kaum entfernt werden können. Dabei könnten viele Arzneimittel und auch andere Schadstoffe im Abwasser durch Einsatz von Ozon oder mittels eines Aktivkohlefilters entfernt werden. Dies ist allerdings verhältnismäßig aufwendig sowie kostenintensiv und würde sich vorwiegend für relativ große Kläranlagen in einem Ballungsraum rentieren.

Das gereinigte, aber noch mit Arzneimitteln belastete Abwasser wird schließlich in einen Vorfluter geleitet, wodurch sich diese durch ihre gute Löslichkeit weiter im Wasserkreislauf verbreiten und dadurch auch in das Grundwasser gelangen. Aber auch ungebrauchte Arzneien, die zur Entsorgung auf Deponien lagern, stellen eine Quelle dieser Spurenstoffe dar, da diese durch Versickerung ins Grundwasser gelangen.

Auch wenn durch die große Verdünnung der Arzneimittel im Grundwasser diese nur als Spurenstoffe nachgewiesen werden, ist momentan noch unklar, wie sich einzelne Arzneimittel in dieser Größenordnung und vor allem die Vermischung mehrerer Wirkstoffe auf die Gesundheit von Mensch und Tier auswirken.

Das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) hat in dem „Arzneimittelbericht Südhessen 1996-2000“ von April 2005 eine Einteilung bezüglich der Arzneimittelgehalte im Grundwasser vorgenommen. Demnach wurden vier Klassen gebildet, die sich durch ihre Konzentrationen von 0 µg/l (d. h. < BG), > 0 – 0,1 µg/l, > 0,1 – 0,5 µg/l und > 0,5 µg/l auszeichnen, wobei sich das HLUG dabei auf die im 5-jährigen Mittel gefundenen Absolutkonzentrationen bezieht. Dies dient lediglich einer groben Einteilung um einen Überblick über Arzneimittelgehalte im Wasser zu bekommen. Das HLUG stellt dabei keinerlei Behandlungsempfehlungen oder ähnliches für die einzelnen Klassen zur Verfügung.

Die Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit und soziale Sicherheit (BMGS) beim Umweltbundesamt gibt in dem Bericht „Bewertung der Anwesenheit teil- oder nicht bewertbarer Stoffe im Trinkwasser aus gesundheitlicher Sicht“ einen gesundheitlichen Orientierungswert (GOW) für verschiedene Stoffe wieder. In der „Liste der nach GOW bewerteten Stoffe“ des Umweltbundesamtes sind GOW für verschiedene Arzneimittel gegeben.

3.4.1 Clofibrinsäure

Einer dieser Medikamentenwirkstoffe, der vermehrt im Grundwasser nachgewiesen worden ist, ist die Clofibrinsäure, die vorwiegend als Blutfett senkendes Medikament, zum Beispiel in Form von

Clofibrat, seit den 60er Jahren eingesetzt wird (Scheytt, 2011, S. 2). Trotz stark gesunkener Anwendungszahl angesichts besser wirkender, nicht-clofibrinsäurehaltiger Medikamente können heutzutage im Grundwasser durch die schlechte biologische Abbaubarkeit infolge der Molekülstruktur der Clofibrinsäure immer noch Konzentrationen nachgewiesen werden.

Laut dem Umweltbundesamt liegt der GOW für Clofibrat bei 3,0 µg/l (vgl. Umweltbundesamt, 2014, „Liste der nach GOW bewerteten Stoffe“, www.umweltbundesamt.de).

3.4.2 Clofibrinsäurenachweis beim Wasserwerks A

1995 wurden erstmals Clofibrinsäurekonzentrationen im Rohwasser des Wasserwerks A festgestellt, wobei die Brunnen E, G, H und J sowie die Brunnen I, II, VI und VII betroffen waren. Das bedeutet, dass trotz der vorhandenen Deckschicht das Arzneimittel in das Grundwasser gelangen konnte, was darauf hindeutet, dass die Deckschicht oberstromig durch ein oder mehrere hydraulische Fenster unterbrochen ist. Die Brunnen III-V und VIII-XIX wurden 1995 einmalig hinsichtlich der Clofibrinsäure untersucht, weswegen man auf Grund negativer Befunde eine weitere Überwachung eingestellt hat.

In dem Statusbericht „Clofibrinsäureuntersuchungen im Einzugsgebiet von Brunnen G“ von Dipl.-Geol., Dipl.-Ing. Jens Bräunig, wurde festgestellt, dass der Eintrag der Clofibrinsäure im Gebiet des Wasserwerks A hauptsächlich durch Kläranlagenabläufe oder die Entsorgung von Produktionsabfällen über die Vorfluter stattfand. Dabei sei der hauptsächliche Eintrag in der Vergangenheit zu datieren, da durch die damaligen häufig vorkommenden Direkteinleiter, die höhere Verschreibungszahl der betreffenden Arzneien und die heutzutage verbesserte Reinigungsfähigkeit des Abwassers durch die Kläranlagen ein deutlich geringerer Clofibrinsäuregehalt in Oberflächengewässern anzutreffen sei.

In der Tabelle 4 sind die aktuellen Clofibrinsäurewerte der Brunnen I-IIIa, VI, VIIa, Ea, G, H und J mit den jeweiligen Probenahmedaten aufgelistet, wobei die verfügbaren Werte an Brunnen IIIa über den gesamten Beobachtungszeitraum unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Darüber hinaus liegen die Konzentrationen der Brunnen VI, VIIa und J ebenfalls unter der Bestimmungsgrenze von 0,04 µg/l. Der Brunnen G weist mit 0,21 µg/l den höchsten Gehalt auf. Die aktuellen Konzentrationen werden nachfolgend zur Szenarienbetrachtung verwendet.

Brunnen	Datum	Attribut	Clofibrinsäure [µg/l]
I	15.04.2014		0,13
II	15.04.2014		0,07
IIIa	15.04.2014	<	0,04
VI	15.04.2014	<	0,04
VIIa	15.04.2014	<	0,04
Ea	22.04.2014		0,17
G	22.04.2014		0,21
H	22.04.2014		0,04
J	22.04.2014	<	0,04

Tabelle 4: Aktuelle Clofibrinsäurekonzentrationen

Auf die vom HLUG vorgenommene Klassifizierung bezogen sind die Brunnen IIIa, VI, VIIa und J in der ersten Klasse anzusiedeln. Die Brunnen II und H liegen in der zweiten Klasse mit $> 0 - 0,1 \mu\text{g/l}$. Die restlichen Brunnen werden der Klasse drei zugeordnet, sodass sich die Konzentration an Clofibrinsäure keines Brunnens in der vierten und damit schlechtesten Klasse befindet.

Jedoch wurden in den vergangenen Jahren deutlich höhere Werte der Rohwässer der Brunnen nachgewiesen. So wurde beispielsweise am Brunnen G der höchste Wert mit $2,2 \mu\text{g/l}$ im September 2001 gemessen, der somit auch relativ weit über der Abgrenzung zur vierten Klasse des HLUG von $0,5 \mu\text{g/l}$ liegt.

Im Hinblick auf den GOW des Umweltbundesamtes liegen nach den aktuellen Analyseergebnissen die Gehalte keiner Brunnen über diesem. Dadurch ist im Hinblick auf die Szenarienbetrachtung ebenfalls keine Überschreitung zu erwarten. Es wird jedoch darauf geachtet, die Konzentration an Clofibrinsäure so gering wie möglich zu halten.

Um einen weiteren Überblick über die Clofibrinsäurewerte der Brunnen zu erhalten, wurde die Entwicklung dieser in der Abbildung 10 gegeneinander aufgetragen. Dabei sind die Werte der Brunnen E und Ea sowie der Brunnen VII und VIIa mit jeweils derselben Farbe dargestellt.

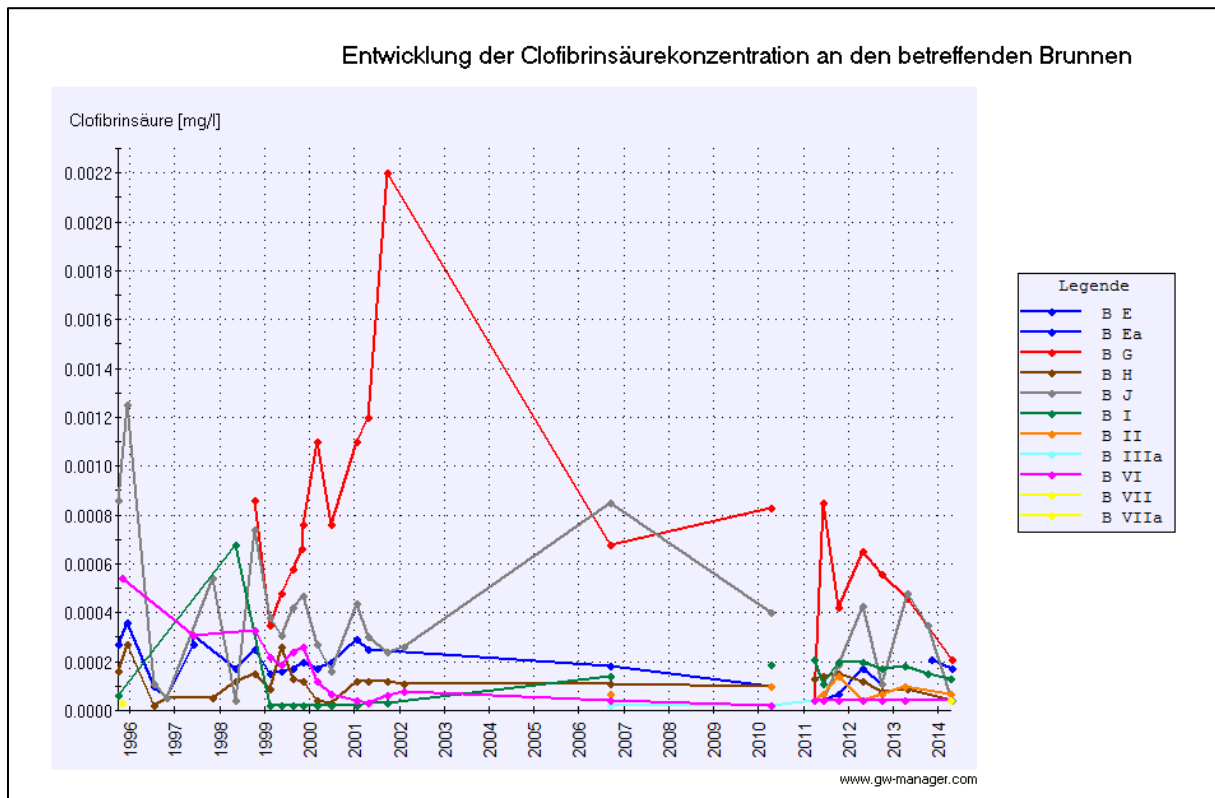


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Clofibrinsäurekonzentration an den betreffenden Brunnen

Von dem Rohwasser des Brunnens Ea existieren angesichts der vergangenen Sanierung aktuell nur zwei Messungen, die es unmöglich machen, einen Trend des Clofibrinsäuregehaltes erkennen zu lassen. Vergleicht man diese zwei Werte mit den vorhandenen Werten des Brunnens E, so liegen diese ungefähr in deren Mittel. Dabei sind die Gehalte des Brunnens E starken Schwankungen unterworfen. Während des Jahres 2011 wurden zweimal Werte $< \text{BG}$ festgestellt.

Die Konzentration an Clofibrinsäure bezüglich des Brunnen G weist einen relativ hohen Wert gegen Ende 2001 von 2,2 µg/l auf, gefolgt von einem Abfall des Gehaltes bis unter die Bestimmungsgrenze (Anfang 2011), daraufhin folgte ein erneuter Anstieg, der allerdings nicht in demselben Maße ausfiel. Aktuell ist wieder ein leichter Rückgang der Konzentration festzustellen. Lediglich im April 2011 konnte ein Gehalt von < 0,04 µg/l nachgewiesen werden.

Die Clofibrinsäurekonzentration des Rohwassers am Brunnen H zeigt einen relativ konstanten Wertebereich zwischen 0,04 µg/l und 0,15 µg/l. Jedoch stechen zwei Werte mit einem Gehalt von jeweils etwa 0,27 µg/l heraus (Dezember 1995 und Mai 1999).

Am Anfang des Untersuchungszeitraumes wurde am Brunnen J ein hoher Clofibrinsäuregehalt von 1,25 µg/l nachgewiesen. Im Allgemeinen schwanken die Werte des Brunnen J relativ stark, wobei er ab 2010 einen Wert von 0,5 µg/l nicht mehr übersteigt. Dabei lag der Wert dreimal unterhalb der Bestimmungsgrenze (April und Juni 2011, April 2014).

Der zweite gemessene Wert des Brunnens I betrug 0,68 µg/l (Mai 1998) und ist damit der höchste gemessene Wert an diesem Brunnen. Nach einer zeitlich konstanten Konzentration von 0,02 µg/l (1999-2001) stieg diese bis 2011 auf etwa 0,21 µg/l an. Bis heute kann wieder ein leichter Rückgang des Gehaltes wahrgenommen werden.

Am Brunnen II wurde mit der Beprobung erst im Jahr 2006 begonnen, nach der allerdings aufgrund einer etwa vierjährigen Pause erst wieder eine Auswertung von 2010 zur Verfügung steht. Insgesamt wurde das Rohwasser bezüglich der Clofibrinsäure sieben Mal beprobt. Es ist festzuhalten, dass die Konzentration zweimal (April 2011 und April 2012) unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,04 µg/l lagen.

2006 wurde der Brunnen IIIa auf seinen Clofibrinsäuregehalt hin überprüft, wobei keine Konzentration nachgewiesen werden konnte (< BG). Dies setzte sich in den folgenden Jahren bis einschließlich April 2014 fort.

Zu Beginn der Messreihe 1995 wurde der höchste Wert des Brunnens VI von 0,54 µg/l nachgewiesen, der damit der vierten Klasse der vom HLUG festgelegten Bewertung angehört. Daraufhin folgte eine relativ starke Abnahme der Konzentration, die seit April 2010 sogar unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt.

Es liegen lediglich zwei Werte für den Clofibringehalt des Brunnens VII vor, wobei der eine Wert von 1995 dem alten Brunnen VII und der andere Wert von 2014 dem sanierten Brunnen VIIa zugeschrieben werden.

Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass der Brunnen G vorwiegend die höchsten Gehalte an Clofibrinsäure aufweist, gefolgt von dem Brunnen J. Zu Beginn der Messreihe unterliegen die Werte der meisten Brunnen relativ großen Schwankungen, wobei diese mit Ausnahme von den Brunnen G und J im Verlauf der Jahre nicht mehr in einem solchen Umfang auftraten. Dies kann allerdings auch auf eine zeitlich geringere Analysendichte zurückzuführen sein.

Schließlich kann man sagen, dass sich die Werte der einzelnen Brunnen über die Jahre hin einander annähern, was letztendlich im Gesamtblick auf einen Rückgang des Clofibrinsäuregehaltes schließen lässt. Dies würde auch mit der seit einigen Jahren stark rückläufigen Verwendung von diesbezüglichen Arzneimitteln korrelieren. Es kann zwar für die Zukunft langfristig von einer Abnahme der

Clofibrinsäure im Grundwasser ausgegangen werden, welche aber durch ihre hohe Persistenz keinen zeitlich konstanten Rückgang darstellt, sodass zukünftige erhöhte Werte nicht ausgeschlossen werden können.

Da für das Wasserwerk A keine Möglichkeit besteht, dieses Arzneimittel aus dem Rohwasser zu entfernen, steht bei der Fördermengenregelung ebenso die Clofibrinsäure im Vordergrund. Dabei wird versucht deren Gehalt unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,04 µg/l zu halten. Dies ist allerdings aufgrund der vorliegenden Gehalte nicht immer möglich.

Um bezüglich der jährlichen Fördermengen einen groben Überblick über die resultierende Clofibrinsäurefracht zu bekommen, wurden für das Jahr 2013 die monatlichen Fördermengen der Brunnen I, II, Ea, G und H aufsummiert und mit den jeweiligen Gehalten an Clofibrinsäure multipliziert. Dadurch entstanden die in Tabelle 5 gegebenen Werte. Dabei ist festzuhalten, dass der Brunnen Ea aufgrund seiner Sanierung im Jahr 2013 nur während drei Monaten in Betrieb war und sich daher für das Jahr 2014 eine größere resultierende Fracht ergeben wird. Ebenfalls liegen die Konzentrationen an Clofibrinsäure der einzelnen Brunnen über das Jahr nicht bei einem konstanten Wert, sodass sich in der Realität ebenfalls abweichende Frachten ergeben werden. Darüber hinaus können im Verlaufe des Jahres ebenso andere Brunnen mit ihren Gehalten zur Gesamtfracht beitragen, die hierbei aufgrund eines aktuellen Gehalts < BG nicht berücksichtigt wurden. Da die Tabelle lediglich zu einer groben Dimensionierung der Fracht dient, sind diese Abweichungen hinnehmbar.

Schließlich ergibt sich rein rechnerisch für das Jahr 2013 eine Gesamtfracht von etwa 131 kg bezüglich der Clofibrinsäure. Es sei weiterhin erwähnt, dass trotz der relativ hoch erscheinenden Zahl die Konzentration an Clofibrinsäure im gemischten Rohwasser den GOW der BMGS nicht überschreitet.

2013			
Brunnen	Fördermenge [m³/a]	Clofibrinsäure [µg/l]	resultierende Fracht [kg/a]
I	549517	0,13	71,44
II	132360	0,07	9,27
Ea	14679	0,17	2,50
G	183876	0,21	38,61
H	218188	0,04	8,73
Σ	1098620		130,54

Tabelle 5: Jährliche Clofibrinsäurefracht für das Jahr 2013

3.4.3 Andere Arzneimittel

Im November 2010 wurde das Rohwasser des Brunnens G auf verschiedene Arzneimittelgehalte untersucht, wobei ebenfalls nur der bereits bekannte Clofibrinsäuregehalt bestätigt werden konnte. Die Gehalte der Brunnen XVI und XVII wurden Anfang 2012 gleichermaßen untersucht, wobei keine Inhaltsstoffe bezüglich der überprüften Arzneimittel nachgewiesen werden konnte.

Ebenso wurde das Trinkwasser im Reinwasserbehälter des Wasserwerks A im November 2010 hinsichtlich möglicher Arzneimittelgehalte untersucht, wobei lediglich ein Clofibringehalt von 0,05 µg/l nachgewiesen werden konnte, der durch die Konzentrationen der betreffenden Brunnen zustande

kam. Da keine dem Wasserwerk A unbekannten Arzneimittelgehalte nachgewiesen werden konnten, wurden die einzelnen Rohwässer der Brunnen daraufhin nicht explizit untersucht.

4 Bewirtschaftungsszenarien

Im folgenden Abschnitt wird auf die einzelnen Szenarien eingegangen, die zum einen eine Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I-Va beinhalten und zum anderen Bezug auf eine größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XIX nehmen.

4.1 Randbedingungen

Beiden Szenarien liegen einige Randbedingungen zugrunde, die bei der geeigneten Festlegung der Fördermengen der einzelnen Brunnen Relevanz haben und teilweise bereits in Bezug auf die Erstellung einer Einschaltreihenfolge des Wasserwerks A erwähnt wurden.

Unter anderem ergeben sich aufgrund des Betriebs gewisse Mindestgehalte an Eisen und Mangan sowie vorwiegend politisch relevante Gehalte bezüglich der Parameter Nitrat, Σ PSM, Gesamthärte und Clofibrinsäure. Die niedrige Nitratkonzentration stellt dabei rangmäßig die oberste Zielsetzung des Wasserwerks A dar, gefolgt von der Minimierung der Σ PSM-Gehalte, der Gesamthärte und abschließend der Clofibrinsäurekonzentration.

Das Wasserwerk A hat sich zum Ziel gesetzt, den Nitratgehalt im Reinwasser unterhalb von 25 mg/l zu halten. Da keine diesbezügliche Aufbereitung durchgeführt wird, muss dieser Wert auch im gemischten Rohwasser unterschritten werden. Dahingehend wird in der Szenarienbetrachtung ein Gehalt von unter 20 mg/l angestrebt, um unter Umständen auftretende Schwankungen im Verlauf eines Jahres abfangen zu können. Dadurch wird eine gewisse Sicherheit bezüglich dieses Wertes erreicht.

Da die enthaltenen Pflanzenbehandlungsstoffe weder einzeln noch in der Summe die betreffenden Grenzwerte der Trinkwasserverordnung überschreiten, ist dies für das gemischte Rohwasser ebenfalls nicht zu befürchten. Im Folgenden wird darauf geachtet, dass der Wert für Σ PSM im gemischten Rohwasser so gering wie möglich gehalten wird.

Um eine gleichbleibende Qualität des Wassers vor allem gegenüber dem Verbraucher gewährleisten zu können, muss darauf geachtet werden, dass die Gesamthärte der Rohwässer bei einem Wert von 13 °dH liegt und nicht zu stark um diesen Wert schwankt.

In Bezug auf die Clofibrinsäure muss berücksichtigt werden, dass der von Umweltbundesamt gegebene GOW eingehalten wird. Aufgrund der aktuellen Clofibrinsäurewerte ist eine Überschreitung dieses Wertes nicht zu befürchten. Dabei strebt das Wasserwerk A generell einen Gehalt im Reinwasser und daher aufgrund fehlender Aufbereitung hinsichtlich dieser auch im gemischten Rohwasser möglichst unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,04 µg/l an. Dies ist allerdings infolge der Rohwässer der Brunnen Ea, G und H bei dem Szenario I und zusätzlich der Brunnen I und II bei dem Szenario II während der Spitzenlastzeiten nicht realisierbar. Daher wird im Folgenden darauf geachtet, dass dieser Gehalt möglichst gering ausfällt. Um dies zu ermöglichen, wurde zur Deckung der Grundlast lediglich auf Brunnen zurückgegriffen, deren Wert unterhalb der BG liegt. Darüber hinaus wurde berücksichtigt, dass bei der Aufstellung der Reihenfolge die Brunnen mit einem Clofibrinsäuregehalt möglichst weit hinten aufgelistet sind.

Im Hinblick auf die biologische Enteisung und Entmanganung ist auf einen ausreichenden Gehalt an Eisen und Mangan im Rohwasser zu achten. Im Folgenden wird ein Gehalt von mindestens 1,5 mg/l im Falle des Eisens und mindestens 0,15 mg/l im Falle des Mangans angestrebt. Dies ist vor allem bei dem Szenario I zu berücksichtigen, da die Brunnen I-Va dabei außer Betrieb sind, jedoch relativ hohe Werte an Eisen und Mangan aufweisen.

Auf eine Förderung am Brunnen XIX wird infolge der technischen Probleme in Bezug auf die Pumpe generell verzichtet, da er bei der momentanen Bedarfsdeckung des Wasserwerks A ebenfalls außer Acht gelassen und nur im Notfall eingesetzt wird.

Da im momentanen Betrieb des Wasserwerks für die Wahl der sieben ständig aktiven Brunnen der Einschaltreihenfolge eine Grundlast von 590 m³/h und für die Spitzenlast 1095 m³/l veranschlagt werden, sollen diese auch für die folgenden Szenarien gelten. Im Allgemeinen wird dabei berücksichtigt, dass für jedes Szenario zwei bestimmte Einschaltreihenfolgen der Brunnen erarbeitet werden, damit dies der bestehenden Fördermengenregelung des Wasserwerks A gleicht. Dabei ist ebenso zu beachten, dass einzelne Brunnen nicht für einen zu großen Zeitraum außer Betrieb sind, damit keine vermeidbare Stagnation des Wassers entsteht.

In Bezug auf die brunnenspezifischen Fördermengen werden die maximalen Fördermengen der jeweiligen Brunnen verwendet, die in der Anlage A mit der Tabelle 14 gegeben sind. Diese wurden auch zur Erstellung der aktuellen Einschaltreihenfolge genutzt sowie für die Reihenfolgen der Jahre davor, wobei sich dieses Vorgehen über die Zeit bewährt hat.

Bei der Wahl der Brunnen sollte darauf geachtet werden, dass die Brunnen am Ende einer Sammelleitung bei jeder Einschaltreihenfolge spätestens bei der Spitzenlastdeckung in Betrieb genommen werden, um eine etwaige negative Beeinflussung des Wassers zu vermeiden. Im Falle der Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I-Va und des Ausfalls des Brunnen XIX sind dies die Brunnen XIII und XVIII. Im Falle des Szenarios II sind dies die Brunnen Va, XIII und XVIII.

Weiterhin dürfen die rechtlich geregelten Fördermengen pro Jahr der jeweiligen Brunnen nicht überschritten werden. Da die jeweiligen bewilligten Fördermengen nicht brunnenspezifisch sind, ergibt sich für die Brunnen XIV-XVIII eine Menge von 3,2 Mio. m³/a und für die Brunnen I-X, XIII, Ea, G, H und J bzw. VI-X, XIII, Ea, G, H und J eine Menge von 6,0 Mio. m³/a

4.2 Berechnungsgrundlagen

Um bei den gewählten Szenarien die Wahl der Fördermengen der einzelnen Brunnen bewerten zu können, müssen verschiedene Konzentrationen des gemischten Wassers betrachtet werden. Dazu sind nachfolgend alle relevanten Berechnungsformeln für die beiden Szenarien aufgeführt.

Im Hinblick auf das Wasserrecht wurden die genehmigten Fördermengen mittels der nachfolgenden Formel auf m³/h umgerechnet, um diese mit den maximalen Fördermengen der Brunnen vergleichen zu können. Dabei wird von einer Anzahl der Tage pro Jahr von 365 ausgegangen.

$$Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{a}} \right] * \frac{1}{365} \left[\frac{\text{a}}{\text{d}} \right] * \frac{1}{24} \left[\frac{\text{d}}{\text{h}} \right]$$

[1]

Um die Gesamtfördermenge mit der in Tabelle 1 gegebenen durchschnittlichen monatlichen Fördermengen vergleichen zu können, müssen die geplanten Fördermengen des jeweiligen Brunnens von m³/h auf m³/Monat umgerechnet werden. Für einen Monat wird dabei eine durchschnittliche Tagesanzahl von 30 angenommen. Im Einzelnen erfolgte die Umrechnung wie folgt:

$$Q \left[\frac{m^3}{Monat} \right] = Q \left[\frac{m^3}{h} \right] * 24 \left[\frac{h}{d} \right] * 30 \left[\frac{d}{Monat} \right]$$

[2]

Bestimmend für die Gesamthärte sind die im Wasser gelösten Erdalkalien Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺ und Ba²⁺. Da die letzten beiden erwähnten Ionen normalerweise nur in sehr geringen Konzentrationen auftreten, werden diese bei der Berechnung der Gesamthärte vernachlässigt (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 183). Vereinfacht ergibt sich die Gesamthärte daher aus einem Zehntel der Summe der gegebenen Calcium- sowie Magnesiumgehalte, wobei diese jeweils noch mit einem bestimmten Faktor multipliziert werden.

$$Gesamthärte [°dH] = \frac{Ca * 1,4 + Mg * 2,307}{10}$$

[3]

Um die zu erwartenden Konzentrationen der maßgebenden Parameter des gemischten Rohwassers ermitteln zu können, müssen die Konzentrationen ins Verhältnis mit der jeweiligen Fördermenge der Brunnen und mit der Gesamtförderung gesetzt werden. Im Folgenden wurden die resultierenden Konzentrationen von Nitrat, Eisen, Mangan, Clofibrinsäure und \sum PSM der geplanten Förderung mittels der folgenden Formel ermittelt:

$$cX_{gesamt} = \frac{cX_1 * Q_1 + \dots + cX_n * Q_n}{Q_{gesamt}}$$

[4]

Dabei steht cX für die Konzentration des Stoffes X und Q für die Fördermenge. Mittels der Indizes werden die einzelnen Brunnen berücksichtigt.

4.3 Szenario I: Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I-Va

4.3.1 Zusätzliche Randbedingungen für das Szenario I

Auf Grund einer bevorstehenden Sanierung der Brunnen I-Va muss die dadurch ausbleibende Wassermenge durch Erhöhung der Fördermengen der übrigen Brunnen kompensiert werden. Dabei ist für diese Sanierung ein Zeitraum von sechs Monaten veranschlagt worden.

Da durch die geplante Sanierung fünf Brunnen mit einer Nitratkonzentration unter 1 mg/l nicht mehr zur Wasserförderung zur Verfügung stehen, ist ein erhöhter Nitratgehalt verglichen mit dem momentanen Wert des Reinwassers des Wasserwerks A von etwa 10 mg/l unausweichlich. Infolge der Sanierung weisen neben den Brunnen VI und VIIa lediglich noch die vier Brunnen Ea, G, H und J

einen Nitratgehalt von $< 1 \text{ mg/l}$ auf. Dabei weisen diese Brunnen Cofibrinsäurewerte auf, wodurch ein Konflikt zwischen möglichst geringer Konzentration an Clofibrinsäure und dem Nitratgehalt entsteht. Da für das Wasserwerk A die Einhaltung des Nitratwertes Priorität hat, ist ein gewisser Clofibrinsäuregehalt hinnehmbar, solange dieser sich unterhalb des GOWs befindet.

Da lediglich die Brunnen VIIa und Ea drehzahlregelt sind, sollten die restlichen im Falle eines Betriebs der Brunnen den gesamten Bereich der möglichen Fördermenge ausnutzen, um einen erhöhten Energieverbrauch zu vermeiden. Dahingehend ist auf eine optimale Verteilung der Fördermengen zu achten.

Da keine weiteren wasserrechtlichen Beschränkungen in Bezug auf die maximalen Fördermengen der einzelnen Brunnen gegeben sind, wurden die jeweiligen Mengen bezüglich des Wasserrechts von m^3/a auf m^3/h umgerechnet und mit den geplanten Fördermengen der Brunnen verglichen. Demnach ergibt sich für die Brunnen VI-X, XIII, Ea, G, H und J eine Fördermenge von etwa $684 \text{ m}^3/\text{h}$ und für die Brunnen XIV-XVIII eine Fördermenge von ungefähr $365 \text{ m}^3/\text{h}$. Addiert man diese beiden Fördermengen so erhält man eine Menge von $1049 \text{ m}^3/\text{h}$, die dadurch um $46 \text{ m}^3/\text{h}$ geringer ist als die für die Spitzenlast festgesetzte Menge von $1095 \text{ m}^3/\text{h}$. Da der Lastzustand des Spitzenbedarfs von geringer zeitlicher Dauer ist und daher die dafür benötigten Brunnen nicht dauerhaft Wasser fördern, ist eine Gefährdung der wasserrechtlichen Menge ausgeschlossen.

4.3.2 Ermittlung der geeigneten Fördermengen

Mit Hilfe einer Excel-Tabelle wurde nach einer optimalen Fördermengenverteilung im Hinblick auf das Einhalten der Randbedingungen gesucht. Dabei wurde unter anderem darauf geachtet, dass durch die zwei unterschiedlichen Einschaltreihenfolgen, die sich im Betrieb wöchentlich abwechseln, jeder Brunnen für eine Dauer von maximal einer Woche außer Betrieb ist.

Dabei enthält die erwähnte Tabelle die aktuellen Analyseergebnisse der jeweiligen Rohwässer der Brunnen. Bezüglich der Gehalte, die unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze liegen, wurde in diesem Falle bei Eisen und Mangan der Wert Null eingesetzt, da bei diesen ein Mindestgehalt für die Aufbereitung erforderlich ist. Für die anderen Parameter wurde die Bestimmungsgrenze als Wert festgelegt, weil bei diesen eine Minimierung angestrebt wird und sich somit die Betrachtung „auf der sicheren Seite“ befindet.

Durch die erwähnten Berechnungsgrundlagen wurden der Nitrat-, Eisen- und Mangangehalt, ΣPSM sowie die Gesamthärte des gemischten Rohwassers berechnet. Diese Berechnungen wurden in der Excel-Tabelle hinterlegt, sodass bei einer Änderung der Fördermenge eines Brunnens die jeweiligen Werte automatisch neu berechnet wurden.

Dabei wurden durch Einfügen von bedingten Formatierungen die gegebenen Randbedingungen überprüft. Demnach wurde für die benötigte Fördermenge der Wert $590 \text{ m}^3/\text{h}$ beziehungsweise $1095 \text{ m}^3/\text{h}$ festgelegt, in Bezug auf das Wasserrecht $684 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Brunnen VI-X, XIII, Ea, G, H und J und $365 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Brunnen XIV-XVIII, für Nitrat 20 mg/l , für Clofibrinsäure der GOW von $0,1 \mu\text{g/l}$, für Eisen $1,5 \text{ mg/l}$ und für Mangan $0,15 \text{ mg/l}$ festgesetzt. Für die Gesamthärte wurde ein Bereich von 11° dH bis 15° dH gewählt. Waren die berechneten Werte des Rohwassers im Sinne der Fördermengen in Bezug auf die Eisen- und Mangangehalte größer oder gleich der genannten Fördermengen, im Falle der Härte in dem erwähnten Bereich und im Sinne der restlichen

Wasserinhaltsstoffe kleiner oder gleich der genannten Werte, so wurde die Zahl grün gekennzeichnet. Andernfalls wurde die Zahl rot markiert.

Auf dieser Grundlage entstanden die in Anlage D enthaltenen Tabellen bezüglich des Szenarios I, wobei diese für die Spitzenlast gelten. Für die Grundlast wurden die Reihenfolgen ebenfalls mittels Tabellen erstellt, wobei diese aufgrund des Umfangs und keiner nennenswerten Abweichungen von den Randbedingungen nicht in der Anlage hinterlegt sind. In den Tabellen sind dabei die sieben ständig aktiven Brunnen blau gekennzeichnet und die weiteren Brunnen zur Deckung der Spitzenlast rot. Die Spalte „Wasserrecht I“ bezieht sich auf die wasserrechtlich bedingte Fördermenge der Brunnen VI-X, XIII, Ea, G, H und J und die Spalte „Wasserrecht II“ auf die Brunnen XIV-XVIII.

4.3.3 Ergebnis

Die in Anlage D enthaltenen zwei Tabellen zeigen die Fördermengen und die daraus resultierenden Mischkonzentrationen im Falle der Spitzenlast für zwei unterschiedliche Einschaltreihenfolgen.

Bei der ersten Einschaltreihenfolge sind die Brunnen VIIa, IX, X, XVI, XVI, H und J für die Grundlastdeckung zuständig. Zur Spitzenlastdeckung werden noch die Brunnen XIII, XVII, XVIII und G zur Förderung hinzugezogen. Daraus folgen die in Tabelle 6 aufgezeigten Konzentrationen, die jeweils die Randbedingungen erfüllen.

	Rand- bedingungen	erste Reihenfolge		zweite Reihenfolge	
		Grundlast	Spitzenlast	Grundlast	Spitzenlast
Nitratgehalt [mg/l]	< 20	15,87	12,98	16,28	16,85
Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	minimal	0,040	0,052	0,040	0,052
Eisengehalt [mg/l]	> 1,50	1,80	1,98	1,95	2,30
Mangangehalt [mg/l]	> 0,15	0,18	0,22	0,27	0,26
Gesamthärte [°dH]	12 < x < 15	14,31	13,14	13,35	14,02
Σ PSM [µg/l]	minimal	0,009	0,007	0,008	0,009

Tabelle 6: Resultierende Konzentrationen der jeweiligen Zustände des Szenarios I

In Bezug auf die wasserrechtlich erlaubten Fördermengen der Brunnen XIV-XVIII während der ersten Reihenfolge ist der sich ergebende Wert von 475 m³/h zwar zu hoch (vgl. Anlage D, Tabelle 19), was aber durch die bereits erwähnte zeitlich geringe Dauer hinnehmbar ist. Vergleicht man darüber hinaus die monatliche Fördermenge von 788.400 m³, die sich durch die Fördermenge von 1095 m³/h ergeben würde, so liegt dieser Wert deutlich über den durchschnittlichen monatlichen Fördermengen, die in Tabelle 1 gegeben sind. Bei der Erstellung der Einschaltreihenfolge wird darauf geachtet, dass die Brunnen, deren Wasserrecht laut Tabelle überschritten wird, möglichst weit ans Ende der Abfolge gesetzt werden, sodass sie im Verlaufe eines Tages vergleichsweise weniger Wasser fördern. Dies ermöglicht, dass die wasserrechtlich genehmigte Menge eingehalten werden kann.

Bei der zweiten Einschaltreihenfolge dienen zur Grundlastdeckung die Brunnen VI-VIII, X, XIII, XVII und XVIII. Infolge der Spitzenlast fördern auch die Brunnen IX, XIV, Ea, H und J Rohwasser. Die dadurch entstehenden Konzentrationen des gemischten Rohwassers sind in Tabelle 6 gegeben, die ebenfalls die gegebenen Randbedingungen erfüllen.

Wie bei der ersten Einschaltreihenfolge ergibt sich auch hier in Bezug auf das Wasserrecht eine zu hohe Fördermenge. Dies wird im selben Maße gehandhabt, sodass die betreffenden Brunnen ebenfalls in der folgenden Reihenfolge weiter hinten angeordnet werden.

Abgesehen von der bereits erwähnten Bedingung hinsichtlich des Wasserrechts verlief die Erstellung der Einschaltreihenfolge noch unter weiteren Bedingungen. Dabei wird auf eine relativ ausgeglichene Förderung geachtet, sodass die Brunnen, die in der einen Reihenfolge relativ früh eingeschaltet werden, in der zweiten Reihenfolge erst relativ spät zur Fördermenge beitragen. Des Weiteren wird darauf Rücksicht genommen, dass die Brunnen XIII und XVIII regelmäßig in Betrieb sind. Aufgrund der unerwünschten Clofibrinsäuregehalte werden die Brunnen Ea, G und H möglichst weit hinten angeordnet.

Dadurch ergaben sich die in Tabelle 7 gegebenen Einschaltreihenfolgen, die sich in ihrer Form an der aktuellen Einschaltreihenfolge des Wasserwerks A orientieren. Dabei wurden noch keine spezifischen Kalenderwochen eingetragen, da der genaue Zeitpunkt der Sanierung noch nicht bekannt ist.

Kalenderwochen			
Kalenderwochen des betreffenden Zeitraums			
Brunnen	Brunnen	Brunnen	Brunnen
7a	18	7a	18
J	17	J	17
9	8	9	8
10	7a	10	7a
15	13	15	13
16	6	16	6
H	10	H	10
6	14	6	14
13	H	13	H
G	J	G	J
18	Ea	18	Ea
17	9	17	9

Tabelle 7: Einschaltreihenfolge der Brunnen für das Szenario I

Die Ergebnisse bezüglich der Tabelle 6 zeigen, dass während der Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I-Va eine Bedarfsdeckung mittels der übrigen Brunnen ohne große Beeinträchtigungen möglich ist. Es ist lediglich im Hinblick auf den resultierenden Nitratgehalt im Wasser eine Erhöhung, verglichen mit dem aktuellen Wert von etwa 10 mg/l zu erwarten.

4.4 Szenario II: Größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XIX

4.4.1 Zusätzliche Randbedingungen für das Szenario II

Bei diesem Szenario soll eine größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XIX im Vordergrund stehen, wobei die Brunnen I-Va wieder zur Bedarfsdeckung zur Verfügung stehen. Da hierbei alle Brunnen des Wasserwerks A zur Verfügung stehen, sind in Bezug auf Nitrat ähnliche Gehalte wie bei

der aktuellen Förderung (etwa 10 mg/l) zu erwarten. Wobei von einer leichten Erhöhung auszugehen ist, da aus den nitratreichen Brunnen XIV-XIX eine größtmögliche Wassermenge gefördert werden soll.

Aufgrund der bestehenden technischen Problematik am Brunnen XIX wird auch in diesem Szenario auf diesen Brunnen verzichtet, sodass eine größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XVIII betrachtet wird.

In Bezug auf die Brunnen IIIa-Va ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der vorliegenden Leitungsverhältnisse und der relativ hohen maximalen Fördermengen dieser Brunnen lediglich zwei Brunnen parallel auf Volllast laufen können, da sonst der Energieverlust unverhältnismäßig stark ansteigen würde.

4.4.2 Ermittlung der geeigneten Fördermengen

Die Ermittlung der Fördermengen dieses Szenarios verlief dabei gleichermaßen wie bei dem vorhergehenden Szenario, dazu wurde mit den gleichen Excel-Tabellen gearbeitet, wobei die Brunnen I-Va noch hinzugenommen wurden. Dabei gilt nun die Spalte „Wasserrecht I“ für die Brunnen I-X, XIII, Ea, G, H und J.

Um eine maximale Fördermenge der Brunnen XIV-XVIII zu erhalten, wurde darauf geachtet, dass bereits während der Grundlast die wasserrechtlich beschränkte Menge von 365 m³/h erreicht wird und die restliche benötigte Fördermenge durch die Brunnen I-X, XIII, Ea, G, H und J gedeckt wird. Dabei ist ein höherer Energieverlust hinzunehmen, da zum Erreichen der geplanten maximalen Fördermenge die jeweiligen Brunnen von XIV-XVIII nicht alle im Bereich ihrer optimalen Fördermengen liegen können.

4.4.3 Ergebnis

Die in Anlage E hinterlegten Tabellen zeigen die Ergebnisse der Fördermengenbetrachtung bezüglich des Szenarios II. Dabei sind ebenso wie bei Szenario I nur die Tabellen der Spitzenlast hinterlegt worden.

Bei der ersten Einschaltreihenfolge wurden die Brunnen IIIa, VI, XIV, XV, XVI, XVIII zur Grundlastdeckung gewählt. Für die Spitzenlastdeckung werden schließlich die Brunnen I, Va, VIIa, IX, XIII und Ea hinzugenommen. Die dadurch entstehenden Konzentrationen des gemischten Rohwassers sind in Tabelle 8 dargestellt.

	Rand- bedingungen	erste Reihenfolge		zweite Reihenfolge	
		Grundlast	Spitzenlast	Grundlast	Spitzenlast
Nitratgehalt [mg/l]	< 20	10,18	13,46	10,32	12,08
Clofibrinsäuregehalt [mg/l]	minimal	0,040	0,052	0,040	0,052
Eisengehalt [mg/l]	> 1,50	3,22	3,57	2,24	2,95
Mangangehalt [mg/l]	> 0,15	0,24	0,29	0,21	0,25
Gesamthärte [°dH]	12 < x < 15	11,81	13,99	11,16	12,27
Σ PSM [mg/l]	minimal	0,012	0,013	0,012	0,013

Tabelle 8: Resultierende Konzentrationen der jeweiligen Zustände des Szenarios II

In Bezug auf das Wasserrecht der Brunnen I-X, XIII, Ea, G, H und J während der Spitzenlast liegt die stündliche Fördermenge 46 m³/h darüber. Aus den unter Szenario I bereits erwähnten Gründen ist diese Überschreitung im Hinblick auf die durchschnittlichen monatlichen Fördermengen sowie die geringe zeitliche Dauer der Spitzenlast vertretbar. Dies wird bei der Festlegung der Reihenfolge weiter berücksichtigt, sodass die betreffenden Brunnen am Ende dieser Einschaltreihenfolge liegen.

Im Falle der zweiten Einschaltreihenfolge sind die Brunnen Va, VIIa, X, XIV, XVI-XVIII für die Grundlast zuständig. Zur Deckung der Spitzenlast werden die Brunnen II, Iva, VIII, XIII, G und H mit ihren jeweiligen Fördermengen beitragen. In Tabelle 8 sind die parameterspezifischen Konzentrationen dargestellt, wobei mit der ersten sowie der zweiten Reihenfolge die gesetzten Randbedingungen eingehalten werden.

Bei der zweiten Reihenfolge liegt ebenfalls die Fördermenge bezogen auf das Wasserrecht zu hoch, was mittels der Festlegung der Einschaltreihenfolge geregelt wird.

Vergleicht man die resultierenden Werte mit denen des ersten Szenarios, so liegen die Nitratgehalte teilweise deutlich unter denen des Szenarios I. In Bezug auf die enthaltenen Eisen- und Mangankonzentrationen sind ebenfalls deutliche Unterschiede zu erkennen, die auf das Fehlen der Brunnen I-Va beim ersten Szenario zurückzuführen sind. Im Falle der Clofibrinsäure sowie der Gesamthärte sind relativ ähnliche Werte im gemischten Rohwasser zu erwarten. Die Konzentration bezüglich der \sum PSM unterscheidet sich bei beiden Szenarien in der gegebenen Größenordnung nicht voneinander.

Es ergaben sich die beiden Einschaltreihenfolgen, die in Tabelle 9 dargestellt sind. Es wurde dabei auf die bereits erwähnten Bedingungen bei der Erstellung der Reihenfolge geachtet. Wiederum wurden die Kalenderwochen aufgrund des unbestimmten Zeitraums nicht eingetragen.

Kalenderwochen			
Kalenderwochen des betreffenden Zeitraums			
Brunnen	Brunnen	Brunnen	Brunnen
18	16	18	16
17	14	17	14
15	17	15	17
14	18	14	18
3a	10	3a	10
J	5a	J	5a
6	7a	6	7a
9	4a	9	4a
5a	8	5a	8
7a	13	7a	13
13	H	13	H
1	2	1	2
Ea	G	Ea	G

Tabelle 9: Einschaltreihenfolge der Brunnen für das Szenario II

Eine größtmögliche Förderung der Brunnen XIV-XVIII ist mit einer geringen Nitratsteigerung in Bezug auf den aktuellen Wert verbunden. Abgesehen davon liegen alle anderen maßgeblichen Parameter in Bezug auf die gesetzten Randbedingungen in einem optimalen Bereich, sodass generell bezüglich der Rohwasserbeschaffenheit und der Trinkwasserqualität eine größtmögliche Fördermenge mit den in Tabelle 21 und Tabelle 22 gegebenen Fördermengen unbedenklich ist.

4.4.4 Erhöhung des Nitratgehalts am Brunnen XVIII

Aufgrund der Einstellung der Förderung an Brunnen XIX ist ein Anstieg des Nitratgehaltes am Brunnen XVIII zu erwarten, was bereits unter dem Punkt 3.1.2. näher erläutert wurde. In Bezug auf eine maximale Fördermenge der Brunnen XIV-XVIII und damit erhöhter Fördermenge an Brunnen XVIII verglichen mit den letzten Jahren wird die Nitratfahne wahrscheinlich stärker angezogen als momentan. Auf dieser Grundlage kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb von 2-5 Jahren der Nitratwert um ein Vielfaches ansteigen wird. Um den Einfluss eines solchen Anstiegs einschätzen zu können wurde eine Berechnung des zu erwartenden Nitratgehalts im gemischten geförderten Wasser bei erhöhtem Nitratgehalt durchgeführt. Dabei wird für die folgende Bewertung an Brunnen XVIII ein Wert für Nitrat von 50 mg/l sowie 80 mg/l angenommen.

Die restlichen Inhaltsstoffe werden sich beim Brunnen XVIII durch die erhöhte Förderung ebenso verändern, sind aber aufgrund der geringen Änderung bzw. der unter den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung liegenden Werte vorerst nicht relevant, sodass im Folgenden lediglich die Erhöhung des Nitratwertes betrachtet wird.

Wird nun die in dem Szenario II betrachtete Fördermengenregelung hinsichtlich der beiden angenommenen Werte für eine mögliche Nitratsteigerung ergänzt, ergeben sich dadurch vergleichsweise höhere Nitratwerte in Bezug auf das gemischte Rohwasser, welche in Tabelle 10 miteinander verglichen wurden.

	Brunnen XVIII	erste Reihenfolge		zweite Reihenfolge	
		Grundlast	Spitzenlast	Grundlast	Spitzenlast
Nitrat [mg/l]	12	10,18	13,46	10,32	12,08
Nitrat [mg/l]	50	15,29	16,23	15,47	14,85
Nitrat [mg/l]	80	19,33	18,43	19,54	17,04

Tabelle 10: Vergleich der resultierenden Nitratwerte vor und nach einer Nitratsteigerung an Brunnen XVIII

Die Ergebnisse aus Tabelle 10 zeigen, dass bei einem Anstieg des Nitratgehalts an Brunnen XVIII auf 50 mg/l oder 80 mg/l die Randbedingung in Bezug auf Nitrat von < 20 mg/l noch eingehalten werden können. Jedoch liegen die resultierenden Werte bei einem Wert von 80 mg/l an Brunnen XVIII für die Grundlast bei beiden Reihenfolgen nur sehr gering unter 20 mg/l. Eine Aussage über den zu erwarteten Nitratgehalt sowie der zeitliche Verlauf eines solchen Anstiegs sind im Allgemeinen jedoch schwer zu treffen, da dies von unterschiedlichen Faktoren abhängig ist. Dabei ist ebenso nicht auszuschließen, dass der Nitratgehalt über die hier betrachteten 80 mg/l ansteigen könnte, da unmittelbar um den Brunnen XIX Nitratwerte von 140 mg/l nachgewiesen werden konnten (vgl. Abbildung 11).

Aus diesen Gründen, sowie den bereits vorhandenen technischen Problemen des Brunnen XIX, ist die Überlegung einer Stilllegung der Brunnen XVIII und XIX in Zusammenhang mit der Planung eines Ersatzbrunnens sinnvoll, was im nachfolgenden Abschnitt erörtert wird.

5 Erweiterung des Handlungsspielraums des Wasserwerks A

In dem Bericht „Ersatzstandort für Brunnen XVIII und Optimierung der Einzugsgebiete unter Vermeidung qualitativer Risiken“ hat BGS Umwelt im Auftrag des Wasserwerks A nach einem optimalen Standort eines Ersatzbrunnens für den Brunnen XVIII gesucht. Dabei wurden unter anderem mittels eines Software-Programms für verschiedene Förderzustände die Bahnlinien des Grundwassers bezogen auf die Fördermenge der Brunnen konstruiert. Berechnungsgrundlage dafür war eine durchschnittliche jährliche Gesamtförderung von 2,27 Mio. m³ für alle Zustände.

Durch die Konstruktion der Bahnlinien für die verschiedenen Zustände zeigte sich, dass das Einzugsgebiet des geförderten Wassers von Brunnen XIX direkt durch einen landwirtschaftlich genutzten Bereich führt, wodurch sich die hohen Nitratwerte an diesem Brunnen erklären lassen. Ein geringer Teil der Bahnlinien, die den Brunnen XVII und XVIII angehörig sind, gehen ebenfalls durch diese Anbaufläche.

Es zeigte sich, dass im normalen Betriebsfall die Brunnen XVI und XVII Wasser aus dem nördlich gelegenen See, der dem Kiesabbau dient, anziehen und sich dadurch ihr Nitratgehalt aufgrund der Pufferwirkung des Sees verringert. Dabei ist der Anteil der betreffenden Bahnlinien des Brunnens XVII in Bezug auf die gesamten Linien eher gering.

Durch die Modellierung der Einzugsgebiete ließ sich ein gewisser Bereich zwischen den Brunnen XIV und XV ausweisen, in welchem die Grundwasserströmung an diesen beiden Brunnen vorbei zieht und daher nicht in das Einzugsgebiet dieser Brunnen fällt. Dieser Bereich stellte sich daher optimal für einen Ersatzbrunnen dar. Mittels einer erneuten Modellierung der Einzugsgebiete bei einer Förderung der Brunnen XIV-XVII und eines Ersatzbrunnens wurde im Hinblick auf eine optimale Lage der jeweiligen Einzugsgebiete ein passender Standort dieses Brunnens bestimmt. Dieser Standort des Ersatzbrunnens ist in Abbildung 11 aufgezeigt.

Im Folgenden wird der ermittelte Standort für einen Brunnen, der die Brunnen XVIII und XIX ersetzen soll, verwendet, um eine maximale Fördermenge der Brunnen XIV-XVII und des Ersatzbrunnens zu ermitteln.

5.1 Zu erwartende Nitratgehalte

In der Bachelorarbeit „Belastung des Grundwasserleiters mit Nitrat im Einzugsbereich der Brunnen XIV-XIX des Wasserwerks A“ von Dennis Niesler wurde eine Nitratbetrachtung im Bereich der Brunnen XIV-XIX durchgeführt. Bei dieser Arbeit wurde mittels einer Beprobung eines großflächigen Grundwassermessstellennetzes ein Iso-Konzentrationsplan in diesem Bereich erstellt. Dabei wurde auf eine Verwendung der Nitratgehalte der jeweiligen Brunnen zur Erstellung des Plans verzichtet, da diese Werte aufgrund der Vermischung des geförderten Wassers zu einer Verfälschung der resultierenden Konzentrationsgleichen geführt hätte. Dieser Plan wurde mit erneuter Datenerfassung aus dem Frühjahr 2014 aktualisiert, wobei die Abbildung 11 das Resultat darstellt. Mit dieser Abbildung werden Annahmen in Bezug auf die zu erwartenden Nitratgehalte infolge der Verschiebung der Einzugsgebiete der jeweiligen Brunnen getroffen.

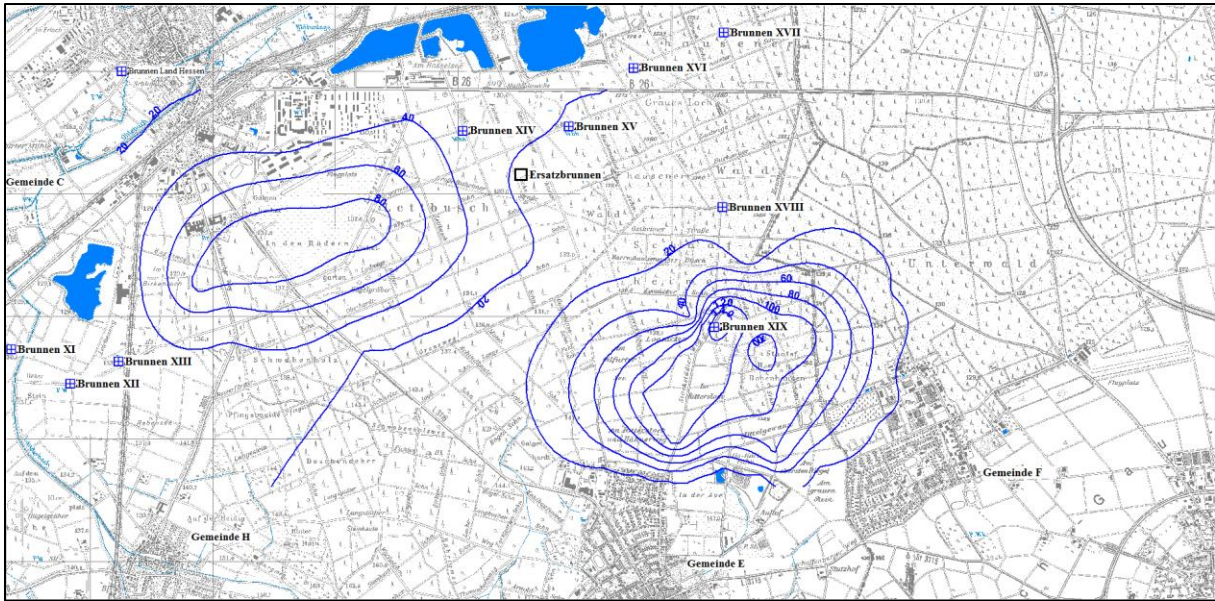


Abbildung 11: Iso-Konzentrationsplan bezüglich des Nitrats mit optimalen Standort des Ersatzbrunnens

In dem Gebiet der Brunnen XIV-XIX zeigen sich zwei Konzentrationsschwerpunkte des Nitrats auf. Zum einen liegt der Brunnen XIX in einem Konzentrationsmaximum von 140 mg/l, dessen hohe Werte sich durch die dortige intensive landwirtschaftliche Nutzung erklären lassen. Der andere Schwerpunkt befindet sich westlich des Brunnen XIV, wobei dieser nicht vergleichbare hohe Werte aufweist, jedoch ebenfalls durch eine landwirtschaftliche Nutzung in diesem Bereich zustande kommt.

Durch Förderung am Ersatzbrunnen verschiebt sich das Einzugsgebiet des Brunnen XIV gering in den äußeren Bereich des betreffenden Nitratschwerpunkts. Dadurch wird im Folgenden eine Nitratsteigerung an diesem Brunnen von aktuell 24,8 mg/l auf 30 mg/l angenommen.

Die Einzugsgebiete der Brunnen XV und XVI verschieben sich aufgrund des Ersatzbrunnens nicht maßgeblich, wodurch keine signifikante Nitratsteigerung zu erwarten ist. Daher werden für die folgenden Berechnungen die aktuellen Nitratwerte 15,2 mg/l im Falle des Brunnens XV und 10,5 mg/l bezüglich des Brunnens XVI verwendet.

Die Anströmzone des Brunnens XVII würde sich in den zweiten Nitratschwerpunkt um den Brunnen XIX verschieben, wobei diese Verschiebung geringfügig ist und nur der Außenbereich des Schwerpunktes durchströmt wird. Dadurch und aufgrund des relativ langen Fließweges ist eine relevante Steigerung des Nitratgehalts an Brunnen XVII auszuschließen. Allerdings zieht der Brunnen nun kein Wasser aus dem Kieselsee mehr an, wodurch dessen Pufferwirkung entfällt. Da diese Änderung der Bahnlinien aber einen relativ geringen Anteil darstellen, wird im Folgenden eine Nitratsteigerung von 8,6 mg/l auf 10 mg/l angenommen.

Da in Bezug auf die Trinkwasserqualität der Nitratgehalt für das Wasserwerk A erstrangig ist, werden Änderungen der anderen Parameter aufgrund der Verschiebung der Einzugsgebiete im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Um dennoch Werte wie die Gesamthärte berechnen zu können, werden auf die aktuellen RUV Ergebnisse der jeweiligen Brunnen zurückgegriffen.

Aufgrund der Lage des Ersatzbrunnens wird an diesem ein Nitratgehalt von 20 mg/l angenommen.

5.2 Zusätzliche Randbedingungen in Bezug auf die Förderung mit Hilfe eines Ersatzbrunnens

Bei der Betrachtung der Fördermengenregelung mit dem geplanten Ersatzbrunnen gelten die unter Punkt 4.1. erläuterten Randbedingungen.

Darüber hinaus muss wegen des Wegfallens des Brunnens XVIII bedacht werden, dass Brunnen XVII bei beiden Einschaltreihenfolgen Wasser fördert, da dieser nun am Ende der Sammelleitung angeordnet ist.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Ersatzbrunnen über eine drehzahlgeregelte Pumpe verfügt. In dem Bericht „Ersatzstandort für Brunnen XVIII und Optimierung der Einzugsgebiete unter Vermeidung qualitativer Risiken“ von BGS Umwelt wurde darüber hinaus erläutert, dass für den Ersatzbrunnen eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit als bei Brunnen XVIII zu erwarten ist. Daher wurde im Folgenden der Wert 100 m³/h für eine maximale Fördermenge angenommen.

5.3 Ermittlung der geeigneten Fördermengen

Das Vorgehen zur Ermittlung der optimalen Verteilung der Fördermengen der einzelnen Brunnen erfolgte dabei wie bei den Szenarien I und II mittels einer Excel-Tabelle. In Bezug auf Nitrat wurden dabei die unter Punkt 5.1.1. getroffenen Annahmen für die jeweiligen Brunnen übernommen. Um die Inhaltsstoffe im gemischten Rohwasser berechnen zu können, wurden für den Ersatzbrunnen für Eisen, Mangan, Calcium, Nitrat und \sum PSM Werte angenommen, die zwischen denen der Brunnen XIV und XV liegen. Aufgrund der Lage des Ersatzbrunnens ist dieses vereinfachte Vorgehen möglich. Allerdings können sich aufgrund der tatsächlichen Gehalte in diesem Bereich Änderungen in Bezug auf die resultierenden Konzentrationen im gemischten Rohwasser ergeben, die allerdings in keinem signifikanten Bereich zu erwarten sind. Bei den Brunnen I-X, XIII, Ea, G, H und J wurden die aktuellen Analyseergebnisse verwendet.

Aufgrund der Lage des Ersatzbrunnens wird angenommen, dass dieser dadurch wasserrechtlich in den Bereich der Brunnen XIV-XIX fällt, sodass im Folgenden für die Brunnen XIV-XVII sowie den Ersatzbrunnen eine jährliche Menge von 3,2 Mio. m³ zur Verfügung steht. Ebenso wie bei dem Szenario II wurde bereits während der Grundlastdeckung darauf geachtet, dass diese Brunnen ihre maximal zulässige Fördermenge in Bezug auf das Wasserrecht erreichen. Dabei muss aus den bereits unter Szenario II erwähnten Gründen ein etwaiger höherer Energieverlust hingenommen werden.

5.4 Ergebnis

Die in Anlage F hinterlegten Tabellen zeigen die jeweiligen Fördermengen sowie resultierende Konzentrationen im gemischten Rohwasser während der Spitzenlast in Bezug auf die erste sowie zweite Einschaltreihenfolge.

Im Zuge der ersten Einschaltreihenfolge werden die Brunnen IIIa, X, XIV, XV, XVII, J und der Ersatzbrunnen zur Grundlastdeckung verwendet. Im Falle der Spitzenlast kommen die Brunnen I, Va, VIIa, IX, XIII und Ea hinzu. Daraus folgen die in Tabelle 11 dargestellten Gehalte.

Bei der zweiten Einschaltreihenfolge dienen die Brunnen Va-VIIa, X, XIV, XVI und XVII mit ihren jeweiligen Fördermengen zur Deckung der Grundlast. Die Brunnen II, IVa, VIII, XIII, G und H sind zusätzlich zu Spitzenlastzeiten in Betrieb. Die resultierenden Ergebnisse sind wiederum in Tabelle 11 enthalten.

	Rand- bedingungen	erste Reihenfolge		zweite Reihenfolge	
		Grundlast	Spitzenlast	Grundlast	Spitzenlast
Nitratgehalt [mg/l]	< 20	12,30	13,97	10,87	12,45
Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	minimal	0,040	0,052	0,040	0,052
Eisengehalt [mg/l]	> 1,50	2,76	3,34	2,39	3,07
Mangangehalt [mg/l]	> 0,15	0,18	0,26	0,27	0,29
Gesamthärte [°dH]	$12 < x < 15$	12,49	14,34	11,57	12,54
Σ PSM [µg/l]	minimal	0,012	0,013	0,012	0,013

Tabelle 11: Resultierende Konzentrationen der jeweiligen Zustände mittels des Ersatzbrunnens

Durch die Wahl eines Ersatzbrunnens für Brunnen XVIII und XIX ergeben sich vergleichbare Nitratwerte mit denen des Szenarios II vor der Erhöhung des Nitratgehalts an Brunnen XVIII. Alle weiteren maßgeblichen Parameter liegen ebenso in den gleichen Größenordnungen, wie die des Szenarios II.

Kalenderwochen			
Kalenderwochen des betreffenden Zeitraums			
Brunnen	Brunnen	Brunnen	Brunnen
17	14	17	14
Ersatzbr.	16	Ersatzbr.	16
15	17	15	17
14	6	14	6
3a	7a	3a	7a
10	5a	10	5a
J	10	J	10
5a	4a	5a	4a
9	13	9	13
13	8	13	8
7a	H	7a	H
1	2	1	2
Ea	G	Ea	G

Tabelle 12: Einschaltreihenfolge der Brunnen zuzüglich des Ersatzbrunnens

Im Hinblick auf die Einschaltreihenfolge wurde dasselbe Vorgehen wie bei den vorherigen Szenarien gewählt. Dadurch ergaben sich die in Tabelle 12 dargestellten Reihenfolgen. Aufgrund der enthaltenen Clofibrinsäure sowie der Einhaltung der wasserrechtlich genehmigten Fördermenge sind die Brunnen I, II, Ea, G und H an den hinteren Stellen der jeweiligen Reihenfolge angeordnet.

Die dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass mittels der angenommenen Bedingungen ein Ersatzbrunnen aufgrund der andauernden Problematik an Brunnen XIX und der damit verbundenen Nitratsteigerung an Brunnen XVIII eine gute Alternative für das Wasserwerk A darstellt.

6 Leitungshydraulik

Im Abschnitt 4 und 5 wurden die jeweiligen Entnahmemengen an den Brunnen und die daraus ergebenden Mischkonzentrationen ermittelt. Dahingehend muss überprüft werden, ob die geplanten Fördermengen in Bezug auf das vorhandene Rohrsystem befördert werden können, oder ob beispielsweise ein vergleichsweise zu hoher Energieverlust auftritt, was dazu führen würde, dass die Fördermengenregelung erneut zu überdenken ist.

Hinsichtlich der Fördermengen unterschiedlicher Brunnen in eine gemeinsame Sammelleitung besteht eine gegenseitige Beeinflussung, die zu höheren Energieverlusten führen kann. Dies ist auf den zusätzlichen Druck einer fördernden Pumpe zurückzuführen, gegen den eine andere Pumpe arbeiten muss. Je größer dabei die geförderte Wassermenge an einem Brunnen ist, desto größer ist auch der Druck, gegen den ein anderer Brunnen fördern muss. Dies kann unter Umständen auch dazu führen, dass die Fördermenge an einem Brunnen zurückgeht, da die betreffende Pumpe nicht genug Leistung aufbringen kann. Dahingehend sind die geplanten Fördermengen der Szenarien zu überprüfen und gegebenenfalls zu ändern.

Bei den Brunnen IIIa-Va wurde während des Betriebs des Wasserwerks A bereits eine solche Beeinflussung festgestellt, bei denen sich unter Vollast die jeweiligen Pumpen gegenseitig hemmen und dies mit einem hohen Energieverlust verbunden ist. Daher sind lediglich zwei dieser Brunnen zeitgleich in Betrieb.

Ein anderer Grund für einen hohen Energieverlust stellt die Änderung des k -Wertes der Rauheit infolge der Alterung der Rohrleitungen dar. Die Rauheit des Rohres steht im Zusammenhang mit dem Druckverlust über die Rohrlänge und ist materialabhängig. Dabei stellen die Hersteller von Rohrleitungen diese Werte für ihre Produkte zur Verfügung, wobei sich diese lediglich auf den neuen Zustand des Rohres beziehen. Infolge von Korrosion oder Ablagerungen im Rohr kann es zum Teil zu gravierenden Änderungen dieses Wertes kommen. Mittels der Ergebnisse einer Druckmessung kann der aktuelle k -Wert berechnet und somit mit dem gegebenen Wert des Herstellers verglichen werden. Dadurch kann je nach Ergebnis beispielsweise eine Reinigung des Leitungssystems (Molchung) notwendig sein. Dies tritt etwa alle fünf Jahre bei der Sammelleitung der Brunnen I-Va auf, da diese sehr hohe Eisen- und Mangangehalte aufweisen, wodurch es infolge von Oxidation im Rohr zu Ablagerungen kommt.

Bei einer solchen Druckmessung wird an verschiedenen Stellen des Leitungssystems der Druck gemessen. Dabei sollten die Fördermengen der Brunnen der betrachteten Sammelleitung möglichst konstant gehalten und notiert werden, da diese für die Berechnungen relevant sind. Schließlich kann so auf den Energieverlust des Leitungssystems rückgeschlossen werden.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit konnten jedoch keine Druckmessungen durchgeführt werden.

Im Folgenden wird eine beispielhafte Geschwindigkeits- und Druckberechnung mittels der Software STANET dokumentiert. Dabei wird vorhergehend auf die dazu notwendigen Berechnungsgrundlagen sowie auf das Berechnungsprogramm STANET eingegangen.

6.1 Berechnungsgrundlagen

Maßgeblich zur Ermittlung der Rohrhydraulik ist die nach Daniel Bernoulli benannte Bernoulli-Gleichung. Demnach ist die Summe der geodätischen Höhe z , der Geschwindigkeitshöhe $\frac{v^2}{2g}$ und der Druckhöhe $\frac{p}{\rho g}$ gleich der Energiehöhe H_E . Durch Verluste infolge von Reibung oder Ähnlichem wird noch ein Verlustterm hinzu addiert, der die Verlusthöhe h_v darstellt. Das g steht im Folgenden für die Erdbeschleunigung. Entlang einer Stromlinie gilt:

$$H_{E_{i,k}} = \frac{v_{i,k}^2}{2g} + \frac{p_{i,k}}{\rho g} + z_{i,k} + h_{v_{i,k}} = \text{konst.} \quad [5]$$

Die Verlusthöhe setzt sich aus kontinuierlichen und örtlichen Verlusten zusammen.

$$h_v = h_{v,kont.} + h_{v,örtl.} \quad [6]$$

Zu den örtlichen Verlusten zählen unter anderem Querschnittserweiterung sowie Querschnittseinengung, Krümmung des Rohres und Wassereinlauf und -ablauf. Durch die Rauheit der Rohrleitung entsteht ein über die Länge der Rohrleitung kontinuierlicher Verlust.

Nachfolgend ist die Formel für die Berechnung des örtlichen Verlusts dargestellt, wobei ζ_i den Druckverlustbeiwert für den jeweiligen Verlustursprung am Ort i und v_i die Geschwindigkeit an der Stelle i darstellt.

$$h_{v,örtlich.} = \sum_{i=0}^n \zeta_i * \frac{v_i^2}{2g} \quad [7]$$

Die Ermittlung der kontinuierlichen Verlustwerte erfolgt mit der folgenden Formel:

$$h_{v,kont.} = \sum_{i=0}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g} \quad [8]$$

Wie bei der Gleichung für die örtlichen Verluste steht i für die Stelle, bei der dieser Verlust auftritt. λ_i ist die Rohrreibungszahl, die abhängig vom Material sowie vom Alter des Rohres ist, l_i ist die Länge und d_i der Durchmesser des betreffenden Rohrabschnitts.

Aufgrund der gegebenen Leitungslängen der Sammelleitungen des Wasserwerks A sind die örtlichen Verluste verglichen mit den kontinuierlichen vernachlässigbar und werden daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Um die benötigte Geschwindigkeit für die Gleichung nach Bernoulli zu erhalten wird die Kontinuitätsgleichung nach der Geschwindigkeit umgestellt. Die Kontinuitätsgleichung besagt dabei, dass der Durchfluss Q , der sich aus der Geschwindigkeit v und der Querschnittsfläche A der Leitung zusammensetzt, konstant ist.

$$Q = v * A = konst.$$

[9]

Da im Falle des Wasserwerks A kreisförmige Rohrleitungen vorhanden sind, ermittelt sich die Querschnittsfläche, mit dem Parameter d für den Durchmesser des Rohres, wie folgt:

$$A = \pi * \frac{d^2}{4}$$

[10]

Die benötigten Werte für λ können Tabellen entnommen oder mit den nachfolgenden Formeln berechnet werden. Die Strömungen in Rohrleitungen werden dabei in unterschiedliche Bereiche eingeteilt. Für alle Bereiche gibt es unterschiedliche Berechnungsformeln für λ . In geschlossenen Wasserleitungen ist erfahrungsgemäß der Übergangsbereich zwischen hydraulisch glatt und hydraulisch rau vorzufinden (vgl. Karger et. al., 2008, S. 224). Daher wird im Folgenden nur auf die betreffende Gleichung [11] eingegangen, die als Prandtl- Colebrook-Gleichung bekannt ist.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,71 d} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} \right)$$

[11]

Im Übergangsbereich bestimmen die Reynolds-Zahl Re und die Rauheit k die Rohrreibungszahl λ . Die Reynolds-Zahl wird generell in der Strömungslehre dazu verwendet, um zwischen den bereits erwähnten Strömungszuständen (laminar, turbulent) zu unterscheiden. Es gilt die folgende Formel:

$$Re = \frac{v * d}{\nu}$$

[12]

Die kinematische Viskosität ν des Wassers ist temperaturabhängig. Aufgrund der gemessenen Temperatur des Grundwassers im Bereich der Brunnen von etwa 10 °C ergibt sich beispielsweise $\nu = 1,310 \text{ m}^2/\text{s}$ (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 136). Der Parameter d stellt hier den Durchmesser der Rohrleitung dar und v die Geschwindigkeit.

Da die Berechnungsformel für λ selbst von λ abhängig ist, muss bei der Lösung dieser Gleichung iterativ vorgegangen werden. Dabei werden heutzutage spezielle EDV-Programme verwendet. Bei einer manuellen Lösung der Gleichung wird auf das Moody-Diagramm zurückgegriffen. Mit diesem Diagramm kann λ in Abhängigkeit von der Rauheit und der Reynolds-Zahl bestimmt werden.

6.2 Rauheit k

Die Rauheit gibt einen Wert für die Unebenheit der Oberfläche wieder. Die Rauheit von Rohren ist dabei generell materialabhängig und verändert sich im Laufe der Jahre, was unter anderem durch Ablagerungen zustande kommt. Dabei können diese Veränderungen zum Teil sehr gravierend ausfallen. Diese Ablagerungen wirken sich ebenso auf den Durchmesser des Rohres aus und damit verbunden ebenso auf die Querschnittsfläche, die Fließgeschwindigkeit und den Durchfluss. Vor allem bei eisen- und manganhaltigen Wässern ist dies zu beobachten. Die Abbildung 33 und die Abbildung 34 in Anlage G zeigen dabei die Ablagerungen in der Sammelleitung der Brunnen I-Va des Wasserwerks A. Dabei wurde eine Mächtigkeit dieser Ablagerungen mit etwa 15 mm festgestellt. Diese Aufnahme zeigt, dass eine regelmäßige Molchung, wie sie etwa alle fünf Jahre bei dieser Leitung durchgeführt wird, notwendig ist. Bei Leitungen im Ortsnetz kommt es vor, dass das Wasser in den Rohren teilweise zeitlich lange stagniert und sich dadurch starke Ablagerungen bilden können die aushärten. Abbildung 35 der Anlage G zeigt eine Aufnahme von einem Rohr des Trinkwasserversorgungsnetzes. Vor allem bei dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die anzutreffenden Ablagerungen einen großen Einfluss auf die Fördermenge haben und dadurch bei gleichbleibendem Durchfluss zu einem großen Energieverlust führen.

Deshalb ist eine regelmäßige Überprüfung des Leitungssystems notwendig. Dies kann unter anderem mittels einer Kamerabefahrung gemacht werden. Dabei ist eine Kamera auf einem steuerbaren Fahrzeug montiert, welches durch das Rohrsystem fahren kann und dabei Innenaufnahmen macht. Diese können anschließend analysiert werden, wodurch auf den Zustand der Leitungen bezüglich etwaiger Ablagerungen rückgeschlossen wird. Dies dient dabei lediglich einer optischen Überprüfung, wobei der k -Wert danach abgeschätzt werden kann.

Eine andere Alternative bietet die bereits erwähnte Druckmessung, bei der die Rauheit rechnerisch bestimmt wird. Dabei wird an einem Rohrabschnitt an verschiedenen Stellen der Druck in der Leitung gemessen. Im Zusammenhang mit dem Durchfluss an diesem Rohrabschnitt kann mit Hilfe der bereits erwähnten Berechnungsgleichungen der k -Wert ermittelt werden. Hierbei wird mittels der gemessenen Druckdifferenz die Rohrreibungszahl λ berechnet. Anschließend kann mit der Formel 11 die Rauheit berechnet werden.

6.3 Netzberechnungssoftware STANET

Die Berechnungssoftware STANET wurde entwickelt, um die Bemessung von vorwiegend komplexeren stationären und dynamischen Zuständen von Versorgungs- und Entsorgungsnetzen zu vereinfachen. Dabei kann das Programm für Gasnetze, Wasser- und andere Flüssigkeitsnetze, Fernwärme- und Dampfnetze, Stromnetze sowie Abwassernetze genutzt werden (STANET, <http://stafu.de>). Die Netzdaten werden dabei üblicherweise mittels Geoinformationssysteme über spezielle Schnittstellen in die Software eingelesen. Alternativ können die Daten auch aus digitalen Zeichnungsdateien oder teilweise von Hand digitalisiert werden (STANET, <http://stafu.de>).

Im Hinblick auf die Hydraulik werden mittels STANET Drücke, Durchflüsse, Zu- und Abflüsse entsprechend der betreffenden DVGW-Arbeitsblätter ermittelt, sowie abgeleitete Größen wie Fließgeschwindigkeit, Druckverlust und Druckgefälle (STANET, <http://stafu.de>).

Im Hinblick auf seine Netzüberwachung nutzt das Wasserwerk A dieses Programm. Dahingehend sind ebenso die in dieser Arbeit betreffenden Sammelleitungen, Brunnen sowie die Kennlinien der Brunnenpumpen in diesem System hinterlegt.

6.4 Beispielhafte Bemessung einer Sammelleitung

Im Folgenden wird nun beispielhaft eine Betrachtung der Fließgeschwindigkeiten und vorherrschenden Drücke für die Sammelleitung I-Va durchgeführt. Diese Sammelleitung bietet sich an, da infolge einer Sanierung vor einigen Jahren dieses Leitungssystem erneuert wurde. Dahingehend kann ein Vergleich zwischen den ehemaligen gusseisernen Rohren (GJS, früher GGG) und den aktuellen Hart-Polyethylen-Rohren (PE-HD) gezogen werden. Dabei dient diese Betrachtung lediglich einer groben Einschätzung der Abhängigkeit von der Rauheit.

Mit Hilfe des Software-Programms STANET wurde nun für einen geplanten Durchfluss von 270 m³/h eine Betrachtung durchgeführt. Bei der Bemessung mit der aktuellen Sammelleitung folgte letztendlich eine Gesamtförderung von ungefähr 295 m³/h und bei der ehemaligen Leitung von etwa 240 m³/h. Diese unterschiedlichen Fördermengen kommen unter anderem dadurch zustande, dass sich die Brunnen der Sammelleitung gegenseitig beeinflussen. Dabei orientiert sich die Verteilung der einzelnen Fördermengen auf die Brunnen I, IIIa und Va, wobei für den Brunnen I etwa 100 m³/h geplant sind, für Brunnen IIIa 150 m³/h und für Brunnen Va 20 m³/h. Für die Berechnung mit dem ehemaligen Rohrsystem wurde eine gusseiserne Sammelleitung angesetzt. Als Wert für die Rauheit wurde 35 mm angenommen, wobei diese Annahme einen Erfahrungswert darstellt. Die maßgeblichen Parameter dieser Berechnung finden sich in Tabelle 25 und Tabelle 26 der Anlage H wieder. Dabei ist die Sammelleitung zwischen den Brunnen Va und IVa in drei Abschnitte und die Sammelleitung von Brunnen II nach Brunnen I in zwei Abschnitte unterteilt.

Bezeichnung	Höhe	Gusseiserne Leitung			PE-HD-Leitung		
		Geschwindigkeit	Durchfluss	Druck, berechnet	Geschwindigkeit	Durchfluss	Druck, berechnet
	müNN	m/s	m ³ /h	bar	m/s	m ³ /h	bar
Leitung Va-IVa	132,89	0,47	22,55	4,55	0,26	38,00	1,44
Leitung Va-IVa	134,13	0,47	22,55	5,82	0,26	38,00	1,35
Leitung Va-IVa	134,13	0,47	22,55	6,47	0,26	38,00	1,37
Leitung IVa-IIIa	138,71	0,20	22,55	9,49	0,14	38,00	1,00
Leitung IIIa-II	138,09	1,30	147,29	7,95	0,69	191,38	1,02
Leitung II-I	139,20	1,30	147,29	7,88	0,69	191,38	0,92
Leitung II-I	137,76	1,30	147,29	8,65	0,69	191,38	1,07
Leitung I-Wasserwerk	137,63	2,12	239,81	9,02	1,06	294,75	1,09

Tabelle 13: Ergebnisse der STANET-Berechnung

In Tabelle 13 sind die jeweiligen Ergebnisse der STANET-Berechnung aufgezeigt. Eine Darstellung der Anordnung der Sammelleitung sowie der berechneten Geschwindigkeiten befindet sich in Anlage H. Dabei stehen zwei STANET-Pläne zur Verfügung.

Obwohl bei der ehemaligen Leitung ein geringerer Durchfluss als Berechnungsgrundlage diente, zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten sowie Drücke bei dieser Leitung zum Teil deutlich über denen der aktuellen Leitung liegen. Dies ist in einem gewissen Maße durch die von vornherein unterschiedlichen

Nennweiten der ehemaligen und aktuellen Rohre erklärbar. Jedoch ist dies erstrangig den unterschiedlichen k -Werten zuzuschreiben. Betrachtet man die Formel 8, so wirkt sich die Rauheit hierbei in dreifacher Weise aus. Die Rohrreibungszahl λ ist von der Rauheit abhängig (vgl. Formel 11). In Bezug auf den Durchmesser wirkt sich infolge des Rohrquerschnitts k doppelt aus. Korrelierend dazu hat dies Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit, da diese aufgrund der Kontinuitätsgleichung (Formel 9) vom Querschnitt abhängig ist. Diese Zusammenhänge und damit die Abhängigkeit von der Rauheit werden mit den Ergebnissen der STANET-Berechnung bestätigt.

In „Taschenbuch der Wasserversorgung“ von Mutschmann und Stimmelmayer ist eine Tabelle von wirtschaftlichen Fließgeschwindigkeiten verschiedener DN gegeben (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 545). Die Wirtschaftlichkeit der Geschwindigkeit hängt mit den bereits erwähnten Zusammenhängen in der Gleichung 11 zusammen, da sich hierbei die Geschwindigkeit zum Quadrat auf Reibungsverluste auswirkt. Dabei steigen vor allem ab einer Geschwindigkeit > 1 m/s diese Verluste stark an, was verstärkt bei kleinen Nennweiten auftritt (vgl. Karger et. al., 2008, S. 238). Dabei gilt allgemein, dass große Fließgeschwindigkeiten und damit kleine Nennweiten zwar die Kosten für Rohrleitungen senken, im Gegenzug aber die Förderkosten erhöhen (vgl. Mutschmann/Stimmelmayer, 2002, S. 545). Vergleicht man nun diese wirtschaftlichen Geschwindigkeiten mit den berechneten, so liegen diese für beide Sammelleitungen zwischen den Brunnen Va und IIIa teilweise deutlich unter diesen. Für die restlichen Abschnitte der ehemaligen Rohrleitung herrscht eine deutliche Überschreitung der wirtschaftlichen Geschwindigkeit von 0,35 m/s beziehungsweise 1,17 m/s.

Vergleicht man nun die im Falle der sanierten Leitung ab Brunnen IIIa anzutreffenden Geschwindigkeiten, so liegen diese relativ nah an den wirtschaftlichen Geschwindigkeiten. Dabei herrscht im Bereich des letzten betrachteten Abschnitts zwischen dem Brunnen I und dem Wasserwerk näherungsweise eine Übereinstimmung beider Werte. Dies belegt, dass die vorgenommene Sanierung im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sinnvoll war.

Im Hinblick auf die Druckunterschiede sind zum Teil deutliche Differenzen zu erkennen. Das zeigt, dass zum Erreichen des geplanten Durchflusses bei der ehemaligen Leitung relativ viel Druck und damit auch Energie benötigt wird. Dies ist auf die angenommene Rauheit und den daraus resultierenden Fließwiderstand zurückzuführen. Im Hinblick auf das aktuelle Leitungssystem sind relativ konstante Druckverhältnisse vorzufinden, wodurch auch ein geringerer Energieverlust auftritt.

Die Berechnung zeigt, dass die Rauheit im Leitungssystem von maßgebender Bedeutung für den Betrieb eines Wasserwerks ist. Dies liegt an den bereits erwähnten Zusammenhängen in Bezug auf den Durchmesser und die Fließgeschwindigkeit. Daher sollte ein Leitungssystem regelmäßig bezüglich der Rauheit untersucht werden und gegebenenfalls mit Berechnungen auf seine Wirtschaftlichkeit überprüft werden, damit die auftretenden Energieverluste so gering wie möglich ausfallen.

7 Zusammenfassung

Dem Wasserwerk A stehen zur Förderung des benötigten Grundwassers 21 Tiefbrunnen zur Verfügung. Die einzelnen Brunnen weisen Unterschiede in ihrer Rohwasserbeschaffenheit auf, die das Steuerungsregime des Wasserwerks maßgeblich beeinflussen.

Auf der Grundlage dieser Beschaffenheit werden beim Wasserwerk A zwei Einschaltreihenfolgen für die Brunnen erstellt, die auf betriebsbedingt veränderte Förderszenarien anwendbar sind.

Diese Vorgehensweise wurde ebenso auf das Szenario einer Sanierung der Sammelleitung der Brunnen I-Va, das Szenario einer größtmöglichen Förderung der Brunnen XIV-XIX und das Szenario eines Ersatzbrunnens für die Brunnen XVIII und XIX angewendet. Dabei ist mit veränderten Konzentrationen im Mischwasser verglichen mit dem Ist-Zustand zu rechnen, die allerdings im Gesamtüberblick nicht signifikant sind.

Die berechneten Konzentrationen im Mischwasser der untersuchten Förderszenarien können nur einen ersten Anhalt über die zu erwarteten Gehalte geben. Das liegt unter anderem daran, dass die jeweiligen Berechnungen und auch Fördermengenregelungen jeweils für den Verlauf eines Jahres betrachtet wurden, obwohl die verwendeten Analyseergebnisse nur eine Momentaufnahme darstellen. Aufgrund der natürlichen Schwankungen der Wasserinhaltsstoffe kann es dadurch zu abweichenden Ergebnissen im gemischten Rohwasser führen.

In Bezug auf die geänderten Fördermengen ist es empfehlenswert, das Wasser nach erhöhter Förderung an den Brunnen auf den Nitratgehalt zu untersuchen. Vor allem zu Beginn des geänderten Zustands ist eine zeitlich umfangreiche Beprobung sinnvoll. Besonders erwähnenswert ist unter anderem der Brunnen XIII, da bei diesem ein Zusammenhang zwischen Fördermenge und Nitratgehalt festgestellt werden konnte. Ebenso sollte die Nitratentwicklung infolge der bereits erwähnten Problematik an Brunnen XVIII regelmäßig überprüft werden. Mit diesen Untersuchungen können die in dieser Arbeit getroffenen Annahmen kontrolliert und gegebenenfalls durch Neuberechnung fortgeschrieben werden. Unter Umständen kann es notwendig sein, eine Änderung der Fördermengenverteilung vorzunehmen.

Bezüglich der enthaltenen Clofibrinsäure ist eine regelmäßige Überprüfung des Reinwassers vorzunehmen. Darüber hinaus sollte das Rohwasser der betreffenden Brunnen weiter regelmäßig auf deren Gehalt überprüft werden. Dadurch kann auf Änderungen der Konzentration an Clofibrinsäure schnell reagiert werden.

Damit sich die Bakterien auf die geänderten Milieubedingungen in Bezug auf den Eisen- und Mangangehalt, bedingt durch die Sanierung der Sammelleitung während des Szenarios I, einstellen können, sollte die Umstellung auf die geänderte Förderung langsam stattfinden. Vor allem zu Beginn der Sanierung, aber auch in deren weiteren Verlauf sollte das Reinwasser regelmäßig auf eine einwandfreie Funktion der Aufbereitung überprüft werden, damit auftretende Probleme frühzeitig erkannt werden.

Bei der Ermittlung des Standortes für den Ersatzbrunnen in der Untersuchung von BGS Umwelt wurde von einer Gesamtförderung der Brunnen XIV-XVII und des Ersatzbrunnens von 2,27 Mio. m³/a ausgegangen. Daher sind bezüglich einer maximalen Förderung dieser Brunnen (etwa 3,2 Mio. m³/a) möglicherweise andere Nitratwerte zu erwarten. Um diesbezüglich Klarheit zu verschaffen, ist daher

eine erneute Simulation der Bahnlinien entsprechend der größtmöglichen Förderung an diesen Brunnen zu empfehlen.

Generell sollte vor dem Bau eines Ersatzbrunnens die hierfür vorgesehene Stelle erkundet werden. Mit den Ergebnissen dieser ist eine erneute Berechnung der zu erwarteten Konzentrationen im gemischten Rohwasser durchzuführen. Damit kann der geplante Ersatzbrunnen im Hinblick auf die entstehenden Kosten und Nutzen optimal bewertet werden.

In Bezug auf die Leitungshydraulik spielt die Rauheit k einer Wasserleitung eine besondere Rolle, da diese zu einer relevanten Erhöhung des Energieverlustes führen kann. Im Hinblick auf die geplanten Fördermengen der Szenarien sollte das Leitungssystem daher auf dessen Eignung überprüft werden. Ist dabei mit einem zu hohen Energieverlust zu rechnen, ist es empfehlenswert, die geplanten Fördermengen dahingehend zu optimieren oder gegebenenfalls eine Sanierung einer Leitung in Erwägung zu ziehen.

Anlage

Anlage A: Fördermenge, Förderhöhe und Leistung der Brunnen

Brunnen	Fördermenge [m³/h]	Förderhöhe [m]	Leistung [kW]
I	100	32	13,0
II	20	38	3,6
IIIa	150	65	37,0
IVa	150	65	40,0
Va	150	65	40,0
VI	50	30	7,5
VIIa	120	36	22,0
VIII	80	37	9,3
IX	150	32	15,0
X	45	25	5,5
XIII	90	34	11,0
XIV	100	32	11,2
XV	95	48	18,5
XVI	140	28	15,0
XVII	160	26	22,0
XVIII	80	37	11,0
XIX	150	40	22,0
Ea	120	25	13,0
G	75	22	7,5
H	60	26	7,5
J	60	24,2	7,5

Tabelle 14: Fördermenge, Förderhöhe und Leistung der Brunnen

Anlage B: Ergebnisse der aktuellen Rohwasseruntersuchungen

	Einheit	Brunnen I (1)	Brunnen II (1)	Brunnen IIIa (2)	Brunnen IVa (2)	Brunnen Va (2)	Brunnen VI (3)	Brunnen VIIa (4)	Brunnen VIII (5)	Brunnen IX (5)	Brunnen X (5)	Brunnen XIII (5)
Feldmessungen												
Trübung, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Färbung, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Geruch, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Bodensatz, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Wassertemperatur	°C	10,2	10,3	10,4	10,3	10,3	10,8	11,2	11,2	10,9	11,4	10,8
pH-Wert	-	6,72	6,64	6,73	6,76	6,81	6,75	6,83	6,9	7,18	7,19	7,08
elektrische Leitfähigkeit (25 °C)	µS/cm	559	456	456	368	356	438	692	677	768	718	677
Sauerstoff (O2)	mg/l	0	0	0	0	0,2	0	0,6	4	3,1	0,6	1,3
Laboruntersuchungen												
pH-Wert (nach Calcitsättigung)	-	7,15	7,19	7,34	7,39	7,55	7,12	7,15	7,23	7,2	7,18	7,12
Säurekapazität 4,3	mmol/l	3,74	2,93	2,63	2,57	2,03	4,08	4,46	3,49	4,95	5,07	5,68
Basekapazität 8,2	mmol/l	1,52	1,73	1,38	1,08	1	1,6	1,32	0,9	0,65	0,71	0,86
DOC	mgC/l	2,4	1,9	0,8	0,7	0,5	1,8	1	1,6	1,2	2,6	< 0,5
Aluminium	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Ammonium	mg/l	0,24	0,23	0,2	0,19	0,18	0,34	0,27	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Bor gesamt	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Calcium	mg/l	84	94	66	54	49	90	100	100	110	110	110
Chlorid	mg/l	19	18	14	11	21	32	35	37	53	41	22
Eisen gesamt	mg/l	8,81	13	8,79	5,64	6,36	8,31	7,18	< 0,01	0,035	2,76	< 0,01
Hydrogencarbonat	mg/l	225	175,7	157,3	183,8	120,6	246	269	209,7	298,8	306,2	343,4
Kalium	mg/l	2,1	2,3	2	1,6	1,6	2,8	5,1	8	4,7	3,3	1,7
Magnesium	mg/l	11	14	8,6	6,5	5,4	14	14	10	14	15	17
Mangan gesamt	mg/l	0,612	0,743	0,449	0,373	0,366	1,21	0,892	< 0,005	0,0133	0,536	< 0,005
Natrium	mg/l	11	13	11	8,4	9	12	15	16	25	13	9,4
Nitrat	mg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	55	34	3	21
Nitrit	mg/l	< 0,05	0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Phosphat gesamt	mg/l	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sulfat	mg/l	81	172	92	47	49	77	96	71	48	72	32
AOX	mgCl/l	< 0,01	< 0,01	0,015	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Coliforme Keime	1/100ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escherichia coli	1/100ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Koloniezahl (22 °C)	KBE/ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 15: Ergebnisse der RUV der Brunnen I-X und XIII

(1) Probenahmedatum: 21.01.2014; (2) Probenahmedatum: 12.11.2013; (3) Probenahmedatum: 21.01.2014; (4) Probenahmedatum: 13.08.2013; (5) Probenahmedatum: 28.01.2014

	Einheit	Brunnen XIV (1)	Brunnen XV (1)	Brunnen XVI (1)	Brunnen XVII (2)	Brunnen XVIII (3)	Brunnen XIX (3)	Brunnen Ea (4)	Brunnen G (4)	Brunnen H (4)	Brunnen J (4)
Feldmessungen											
Trübung, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Färbung, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Geruch, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Bodensatz, qualitativ	-	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
Wassertemperatur	°C	10,8	10,5	10,6	10,1	10,8	10,9	10,2	10,6	10,1	10,6
pH-Wert	-	7,02	7,03	6,85	6,95	6,72	6,68	7,06	6,64	6,76	6,73
elektrische Leitfähigkeit (25 °C)	µS/cm	503	548	427	306	290	535	538	463	404	480
Sauerstoff (O2)	mg/l	4,5	3,8	5,4	7,2	8,9	9,4	0,1	0	0,1	0
Laboruntersuchungen											
pH-Wert (nach Calcitsättigung)	-	7,37	7,3	7,42	7,73	7,8	7,44	7,18	7,27	7,4	7,31
Säurekapazität 4,3	mmol/l	3,22	3,82	2,58	1,64	1,25	2,11	5,26	2,69	2,57	2,85
Basekapazität 8,2	mmol/l	0,58	0,72	0,61	0,49	0,5	0,79	1,06	1,28	1,19	1,54
DOC	mgC/l	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,9	1,1	0,6	2	2,1	1,2	4
Aluminium	mg/l	< 0,02	0,11	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,03	0,01	< 0,01	< 0,01
Ammonium	mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05	< 0,1	< 0,1	0,23	0,12	0,11	0,22
Bor gesamt	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Calcium	mg/l	75	82	62	42,5	38	79	89	64	54	62
Chlorid	mg/l	24	26	21	20,8	15	24	11	30	22	28
Eisen gesamt	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	0,023	4,7	4,38	3,25	7,46
Hydrogencarbonat	mg/l	193,2	230	154,5	100	73,3	125,5	317,8	161,3	3,3	170,6
Kalium	mg/l	1,8	4,4	2,4	1,4	1,5	1,9	1,9	2,5	153,4	2
Magnesium	mg/l	13	13	9,1	6,6	5,9	9,6	11	8,8	8,2	10
Mangan gesamt	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,01	< 0,005	< 0,005	0,45	0,326	0,228	0,498
Natrium	mg/l	8,9	11	10	8,9	9,1	9,7	8	13	13	15
Nitrat	mg/l	25	15	11	8,6	11	80	< 1	< 1	< 1	< 1
Nitrit	mg/l	< 0,05	< 0,05	0,052	0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Phosphat gesamt	mg/l	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,178	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Sulfat	mg/l	47	47	50	39,8	48	55	10	56	44	59
AOX	mgCl/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Coliforme Keime	1/100ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escherichia coli	1/100ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Koloniezahl (22 °C)	KBE/ml	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 16: Ergebnisse der RUV der Brunnen XIV-XIX und der Brunnen Ea, G, H und J

(1) Probenahmedatum: 25.02.2014; (2) Probenahmedatum: 07.04.2014; (3) Probenahmedatum: 26.06.2013; (4) Probenahmedatum: 22.04.2014

	Einheit	Brunnen I (1)	Brunnen II (1)	Brunnen IIIa (2)	Brunnen IVa (2)	Brunnen Va (2)	Brunnen VI (3)	Brunnen VIIa (4)	Brunnen VIII (5)	Brunnen IX (5)	Brunnen X (5)	Brunnen XIII (5)
Pflanzenschutzmittel												
Atrazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Desethylatrazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00001
Simazin	mg/l	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004
Gamma-HCH (Lindan)	mg/l	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Isoproturon	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Bentazon	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Bromacil	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Hexazinon	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Mecoprop (MCP)	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Propazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Sebuthylazin	mg/l	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Chlortoluron	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Dichlorprop (2,4-DP)	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Diuron	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Terbuthylazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Carbofuran	mg/l	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Metobromuron	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Desisopropylatrazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00002	< 0,00001	< 0,00001	0,00001
Metazachlor	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Monuron	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
MCPA	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Methabenzthiazuron	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Parathionethyl	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Σ PSM	mg/l	k. E. n.	k. E. n.	k. E. n.	k. E. n.	k. E. n.	k. E. n.	k. E. n.	0,00003	0,00002	k. E. n.	0,00002

Tabelle 17: Ergebnisse der PSM-Untersuchungen der RUV der Brunnen I-X und XIII

(1) Probenahmedatum: 21.01.2014; (2) Probenahmedatum: 12.11.2013; (3) Probenahmedatum: 21.01.2014; (4) Probenahmedatum: 13.08.2013; (5) Probenahmedatum: 28.01.2014

	Einheit	Brunnen XIV (1)	Brunnen XV (1)	Brunnen XVI (1)	Brunnen XVII (2)	Brunnen XVIII (3)	Brunnen XIX (3)	Brunnen Ea (4)	Brunnen G (4)	Brunnen H (4)	Brunnen J (4)
Pflanzenschutzmittel											
Atrazin	mg/l	0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00007	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Desethylatrazin	mg/l	0,00001	0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00001	0,00005	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Simazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	0,00001	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00004	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Gamma-HCH (Lindan)	mg/l	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Isoproturon	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Bentazon	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Bromacil	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Hexazinon	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Mecoprop (MCP)	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Propazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Sebuthylazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Chlortoluron	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Dichlorprop (2,4-DP)	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Diuron	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Terbutylazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Carbofuran	mg/l	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Metobromuron	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Desisopropylatrazin	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00009	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Metazachlor	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Monuron	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
MCPA	mg/l	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Methabenzthiazuron	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Parathionethyl	mg/l	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00002	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Σ PSM	mg/l	0,00002	0,00001	0,00001	k. E. n.	0,00001	0,00021	k. E. n.	k. E. n.	k. E. n.	k. E. n.

Tabelle 18: Ergebnisse der PSM-Untersuchungen der RUV der Brunnen XIV-XIX und der Brunnen Ea, G, H und J

(1) Probenahmedatum: 25.02.2014; (2) Probenahmedatum: 26.06.2013; (3) Probenahmedatum: 26.06.2013; (4) Probenahmedatum: 22.04.2014

Anlage C: Entnahmemenge und Nitratwerte der Brunnen von 2010 bis 2014

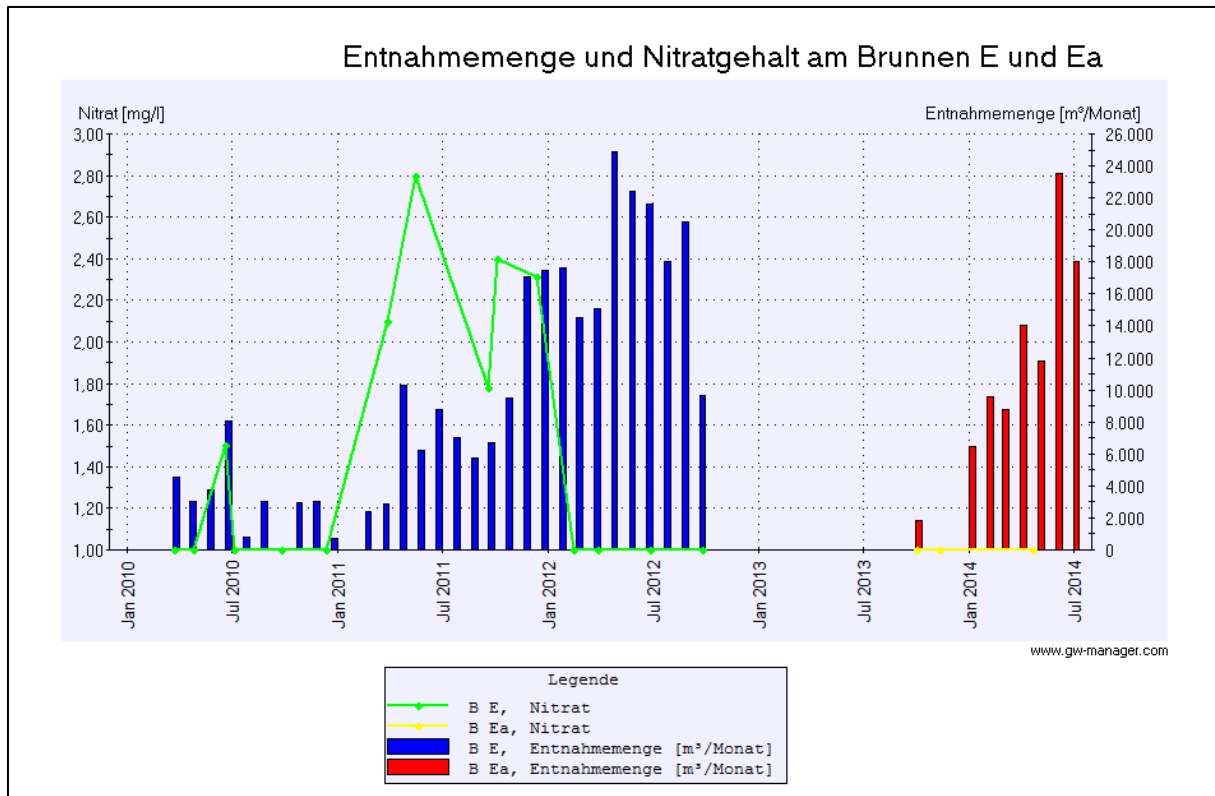


Abbildung 12: Entwicklung des Nitratgehalts an den Brunnen E und Ea

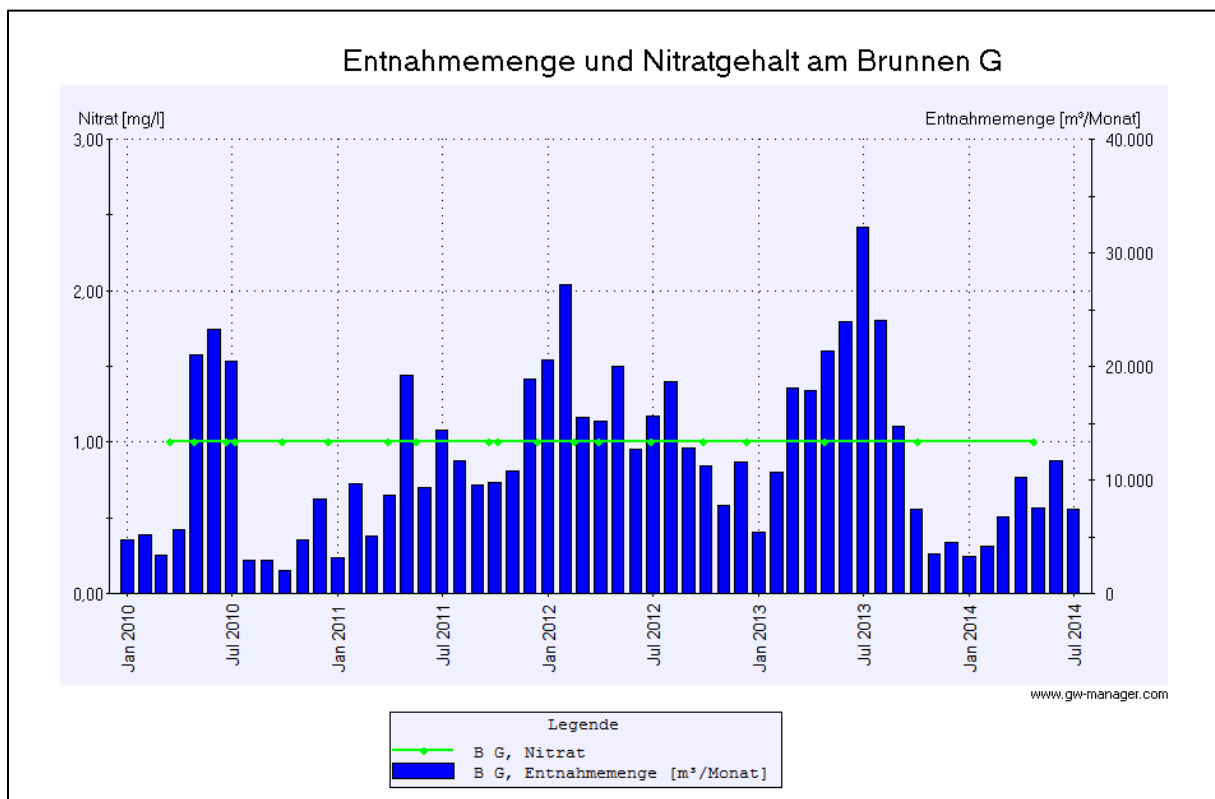


Abbildung 13: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen G

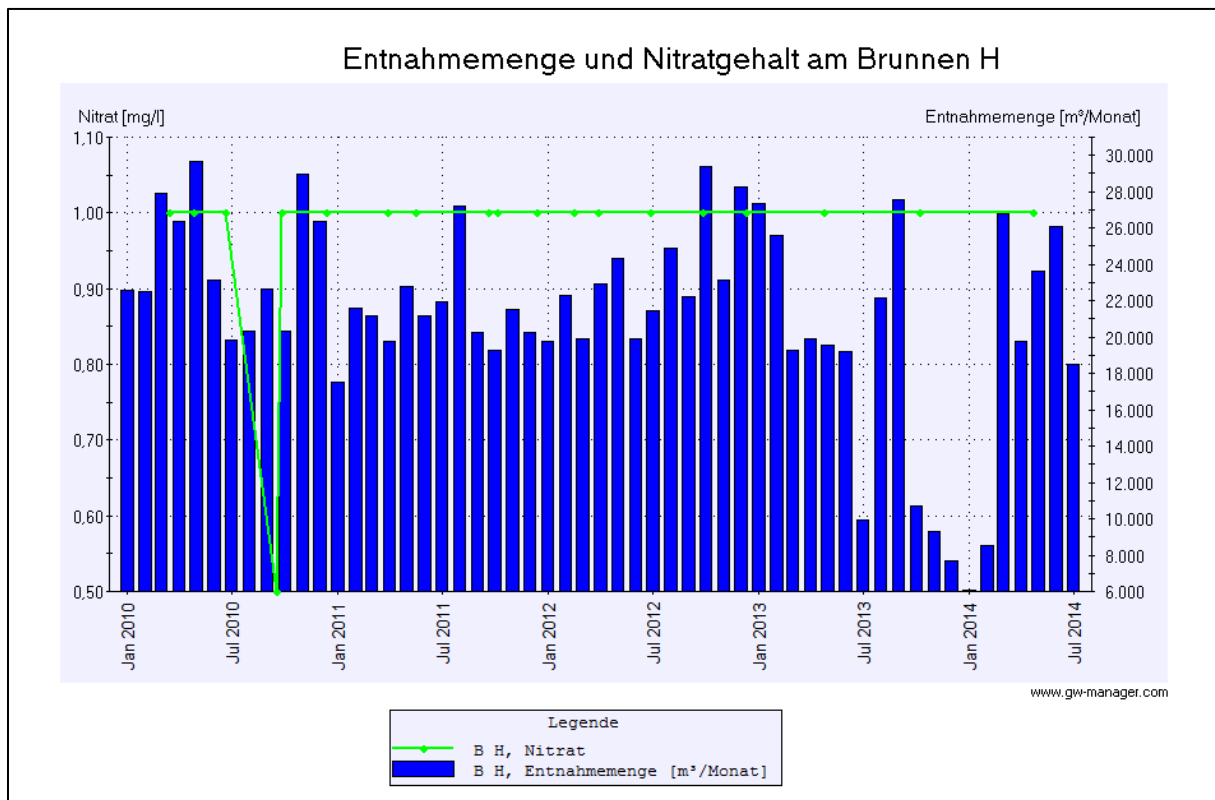


Abbildung 14: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen H

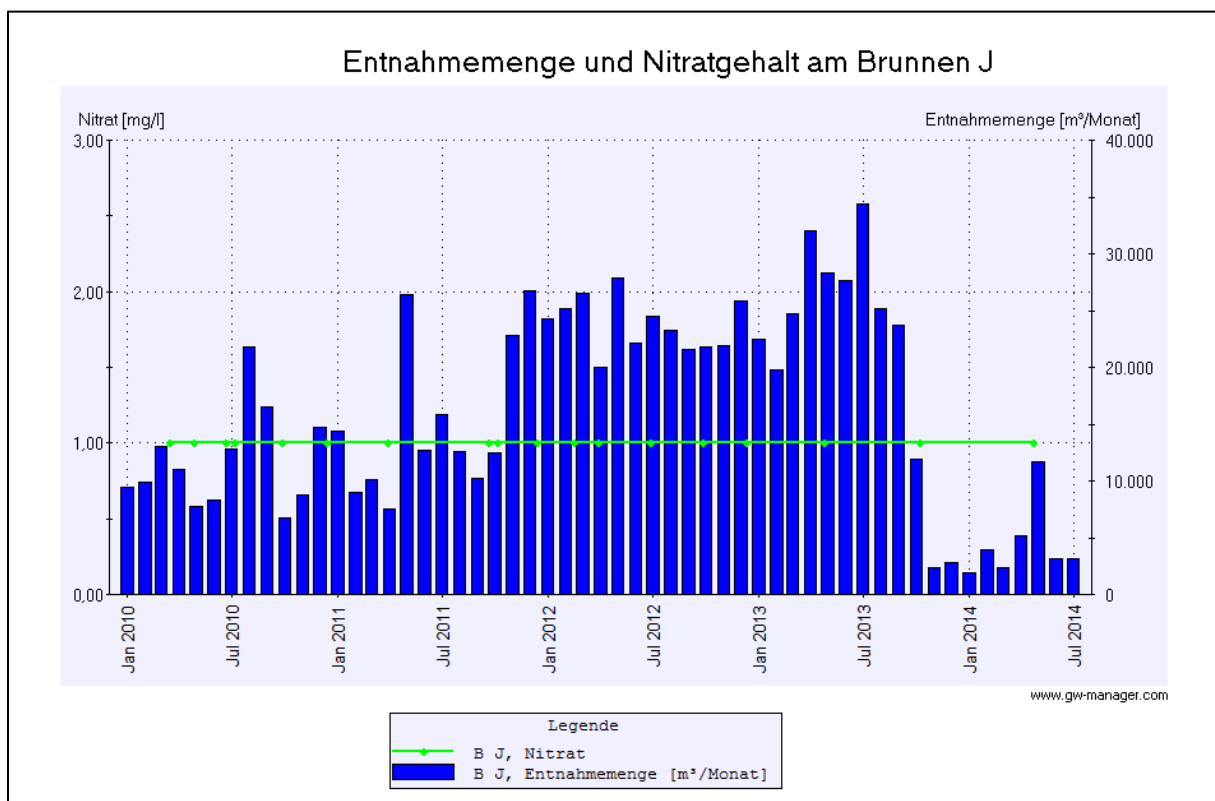


Abbildung 15: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen J

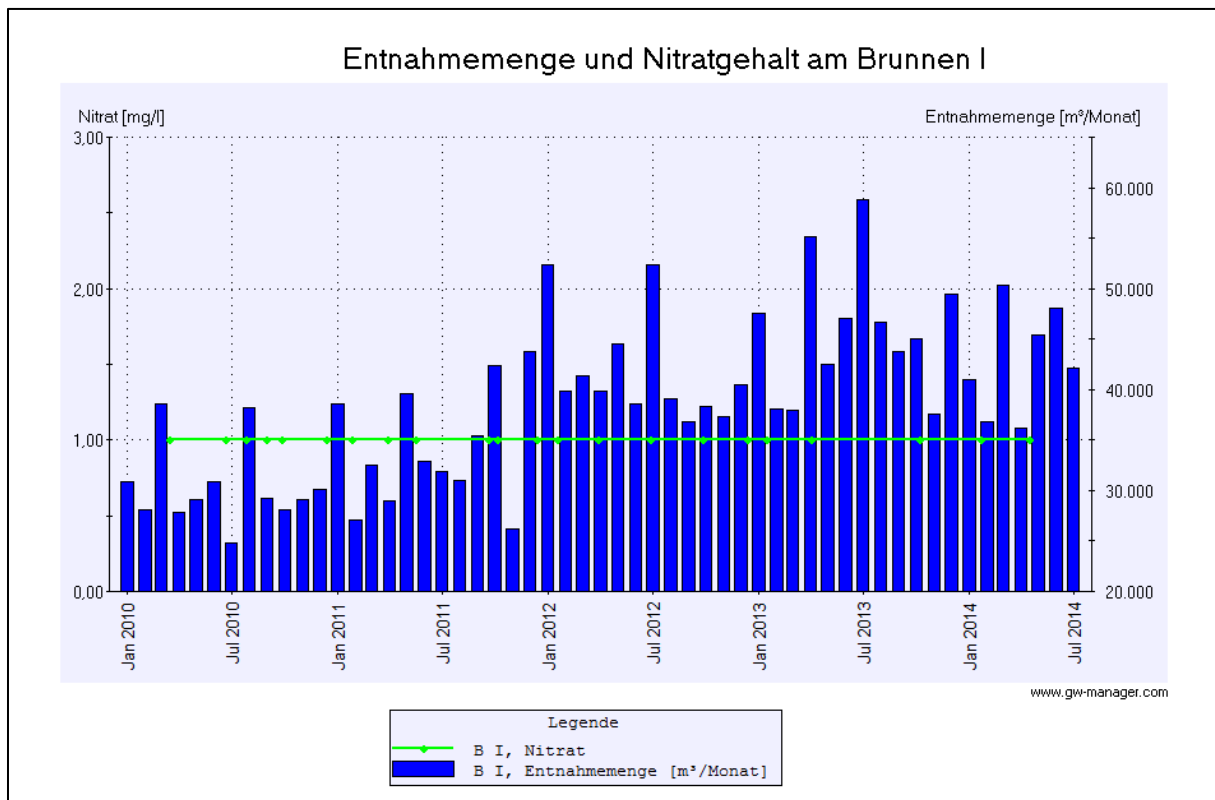


Abbildung 16: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen I

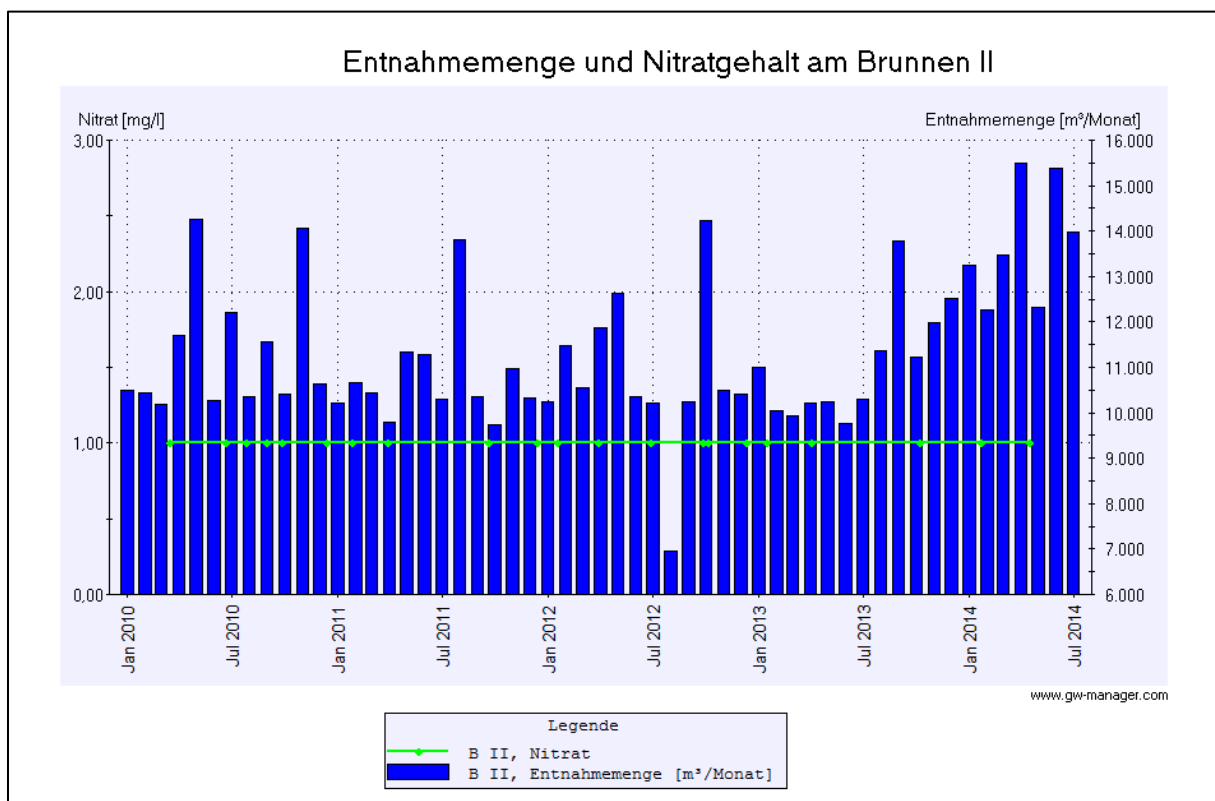


Abbildung 17: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen II

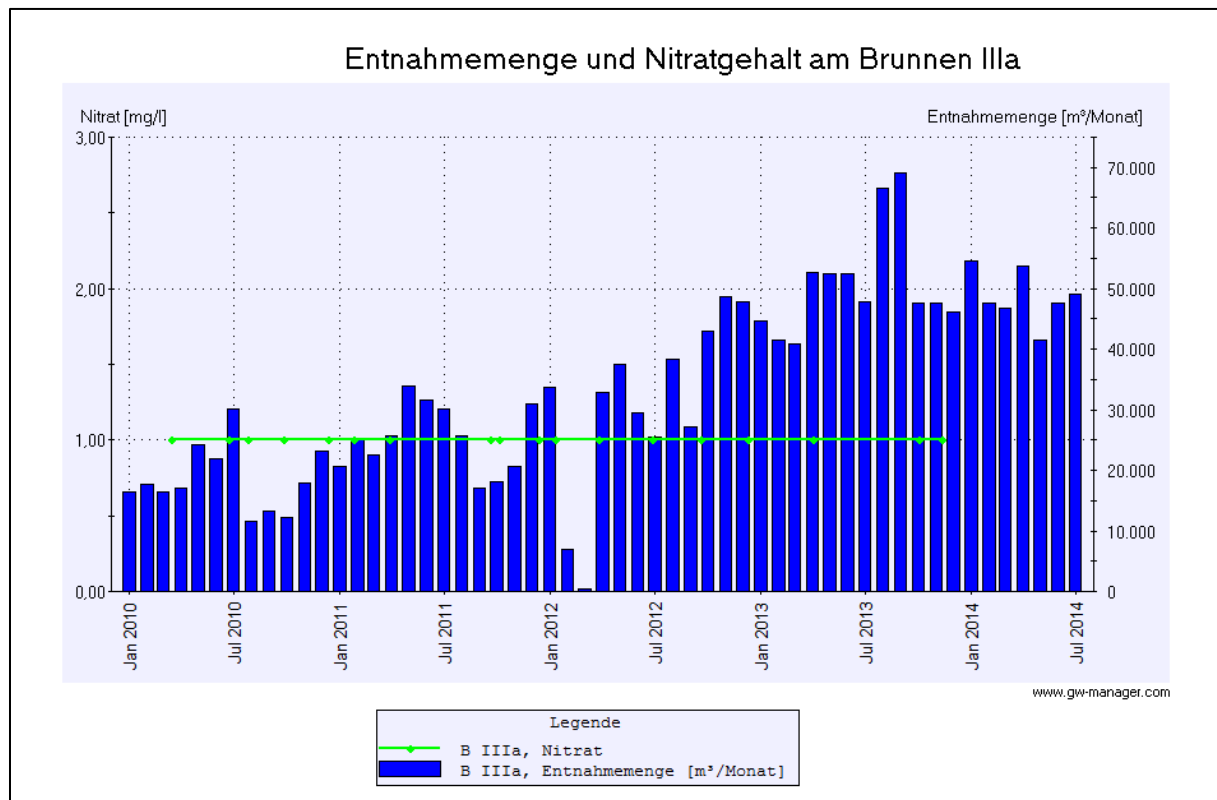


Abbildung 18: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen IIIa

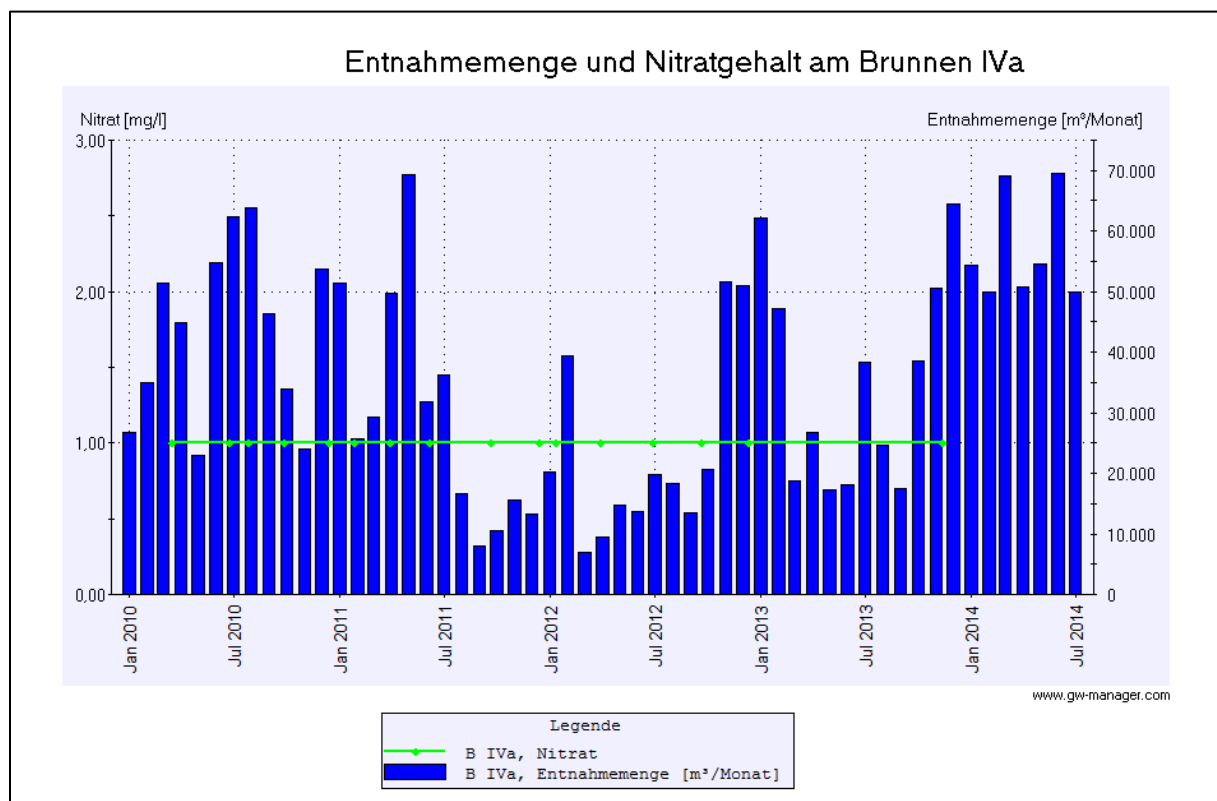


Abbildung 19: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen IVa

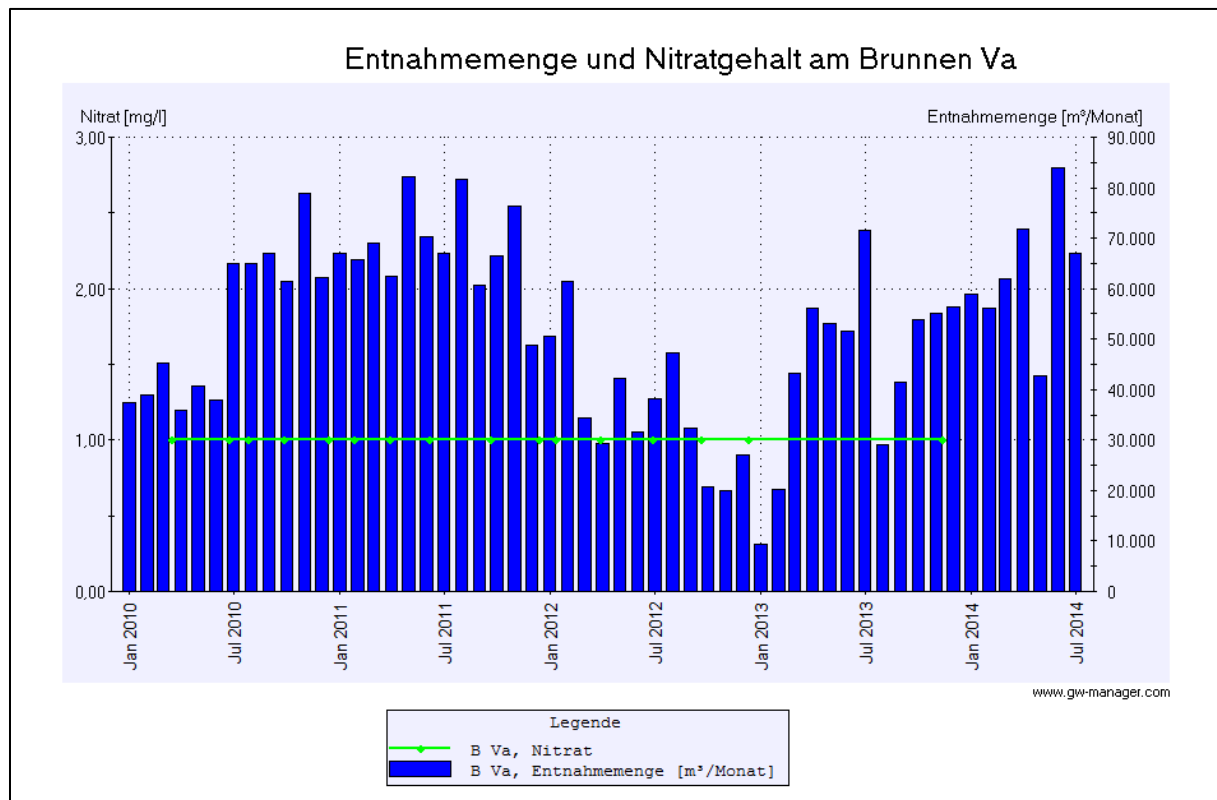


Abbildung 20: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen Va

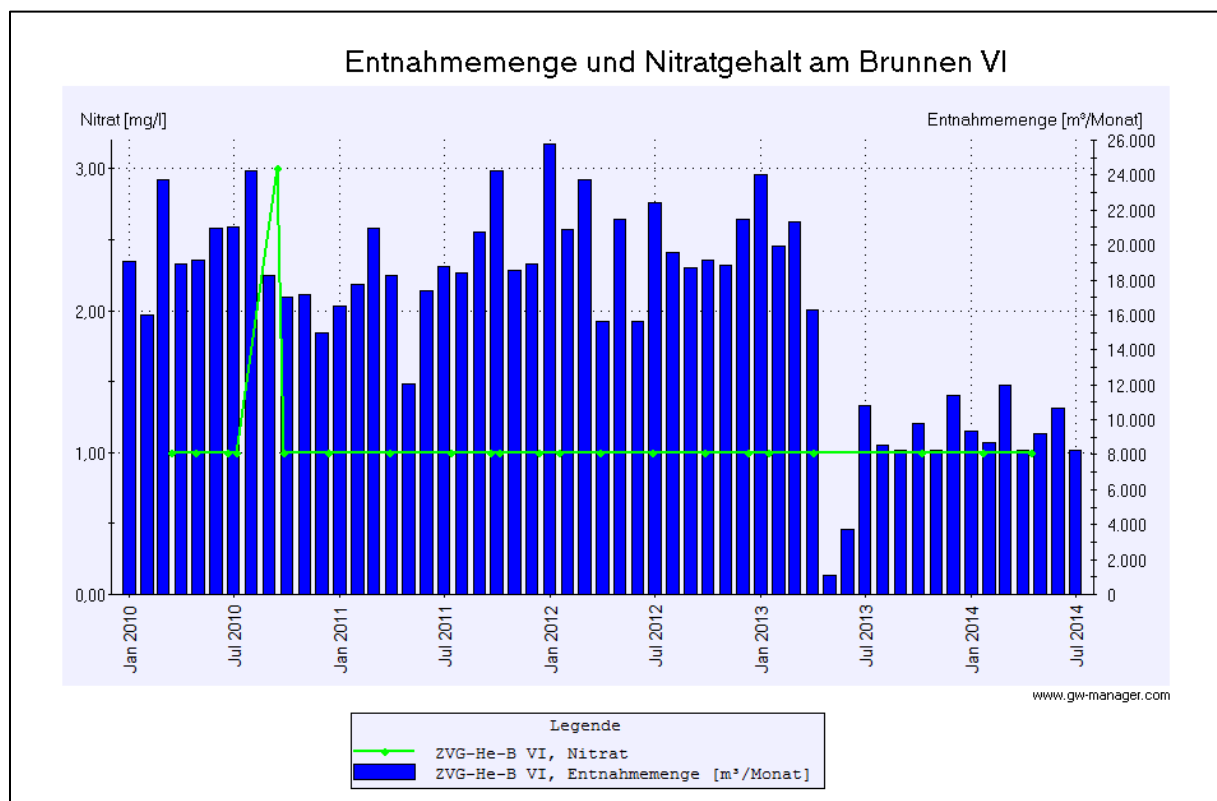


Abbildung 21: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen VI

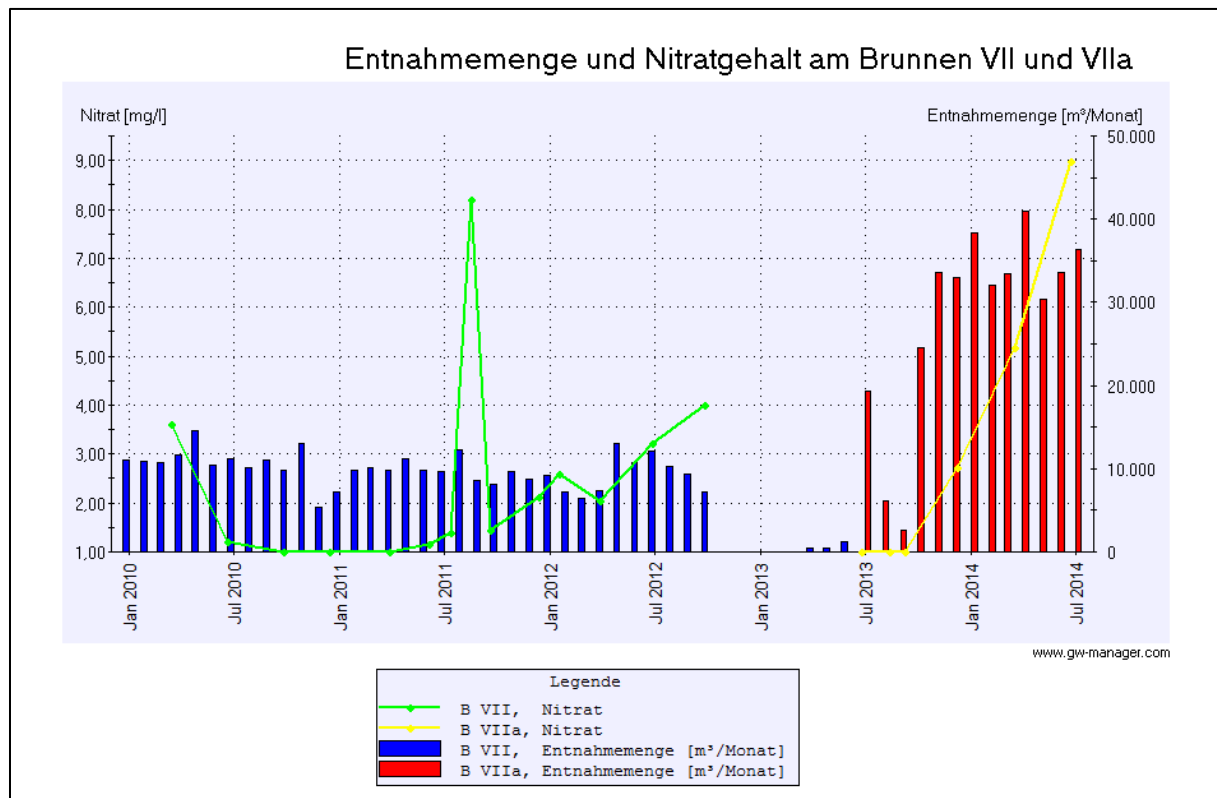


Abbildung 22: Entwicklung des Nitratgehalts an den Brunnen VII und VIIa

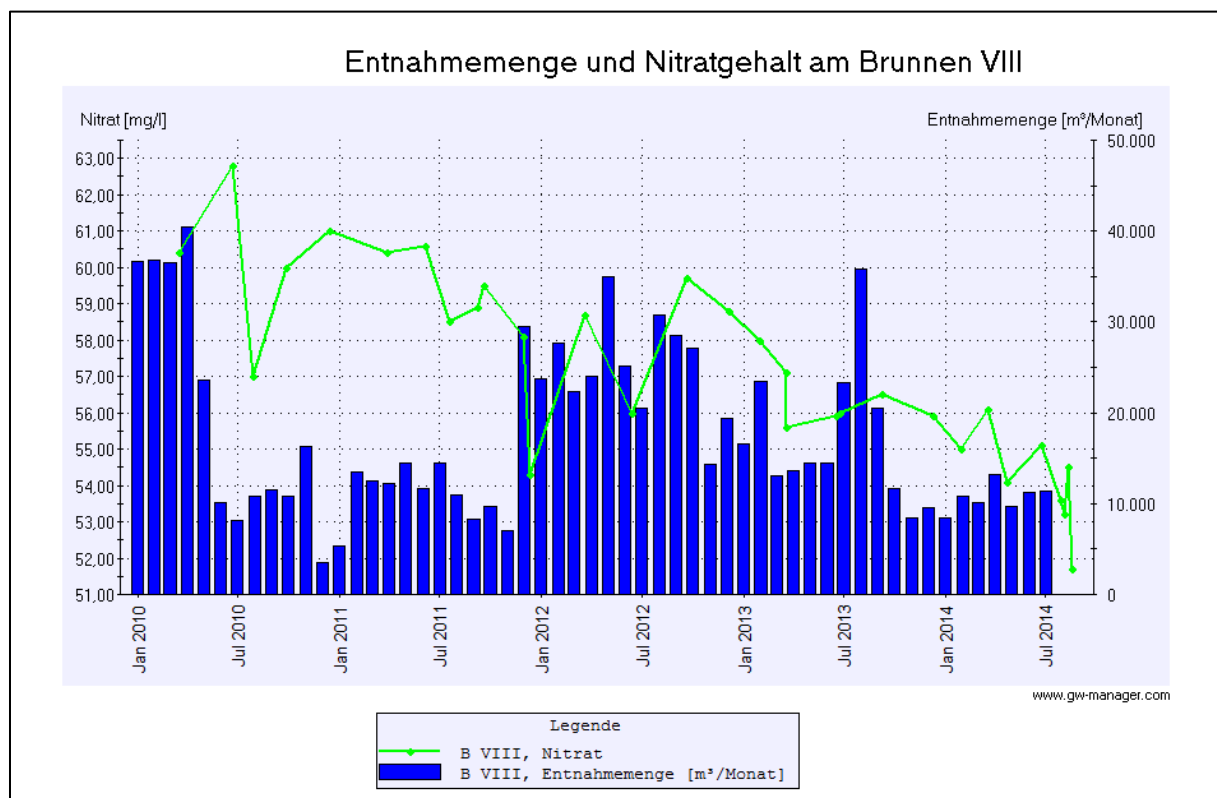


Abbildung 23: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen VIII

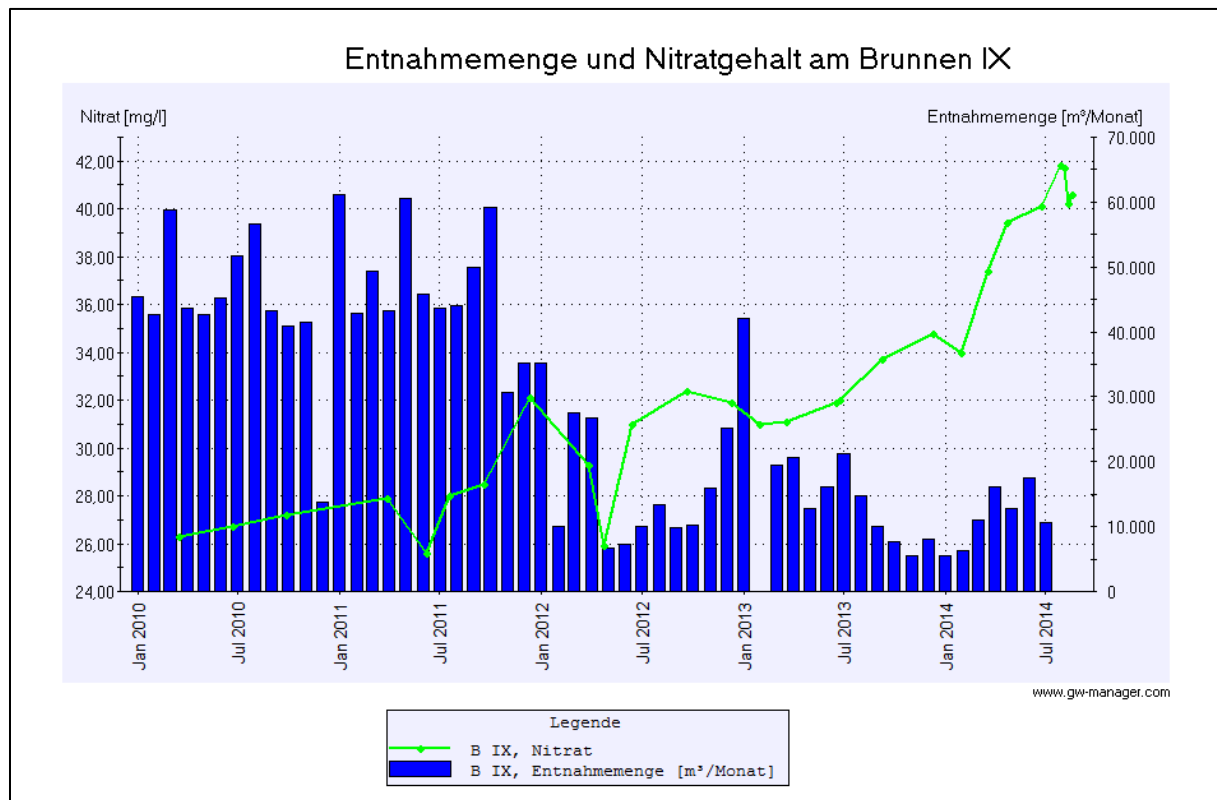


Abbildung 24: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen IX

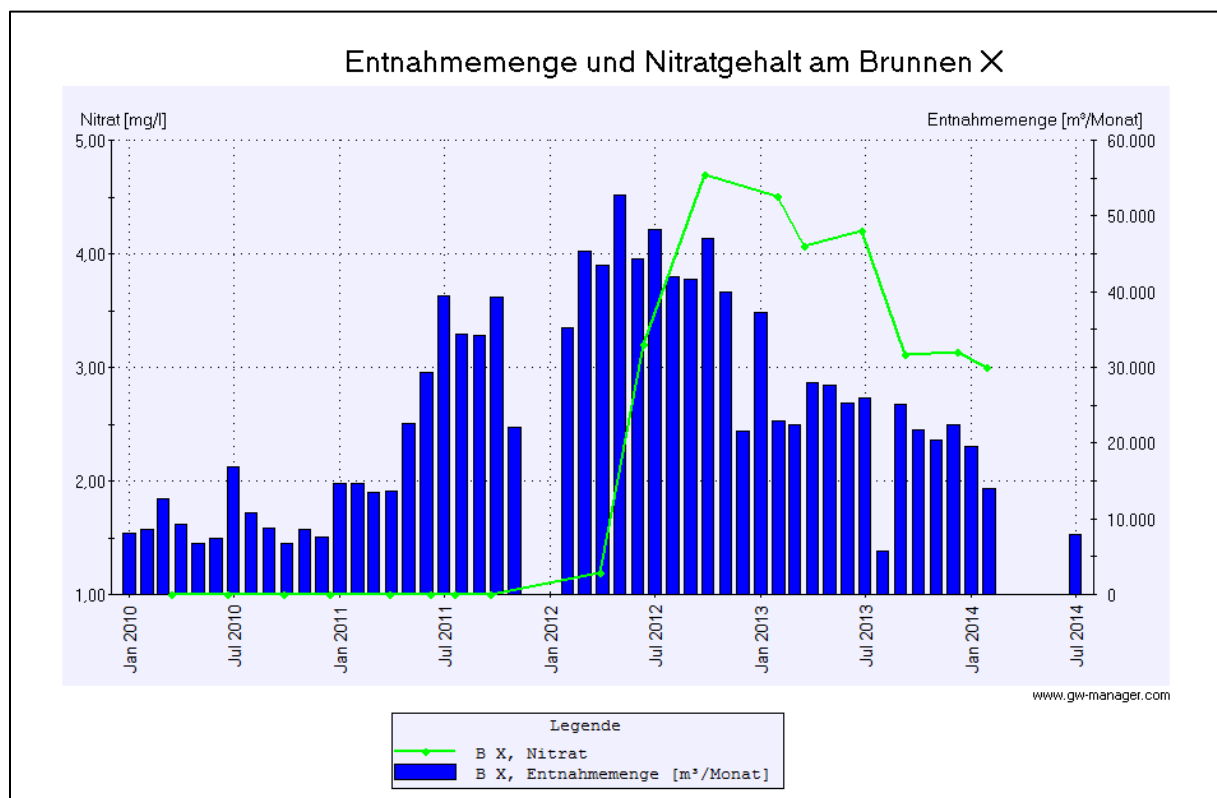


Abbildung 25: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen X

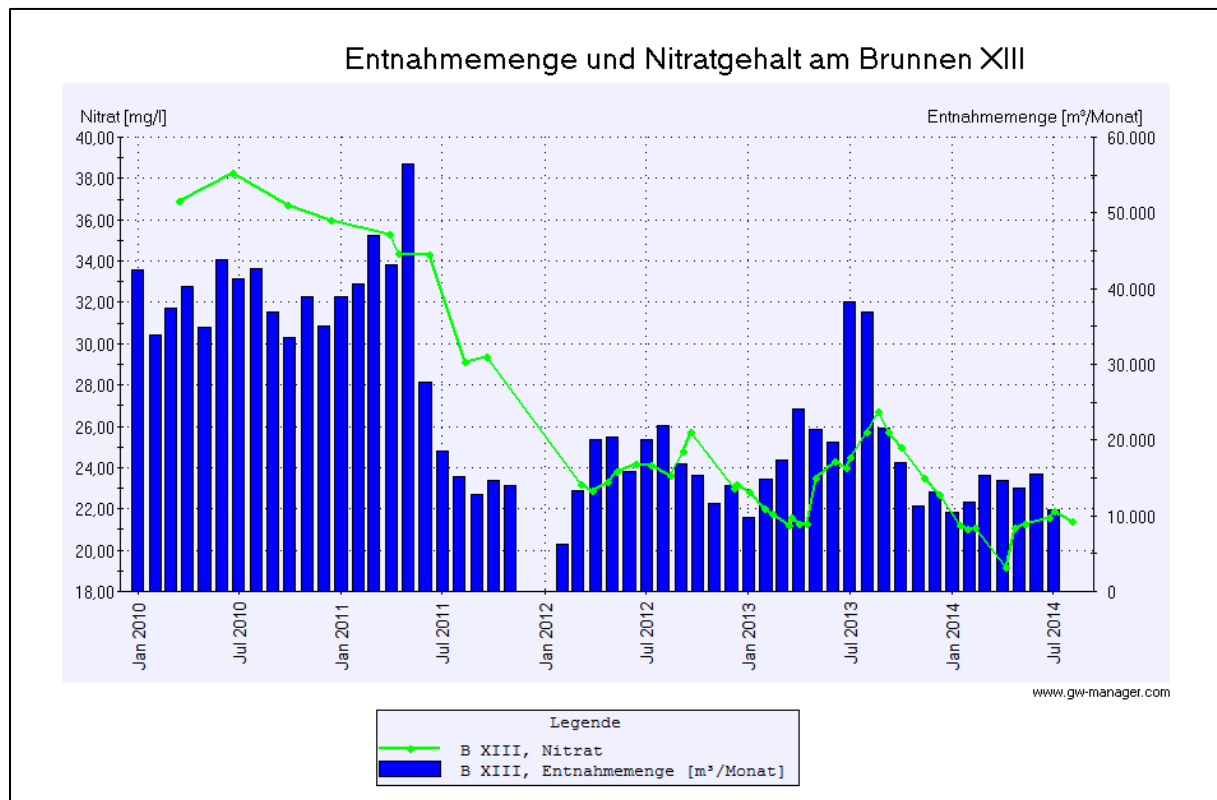


Abbildung 26: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XIII

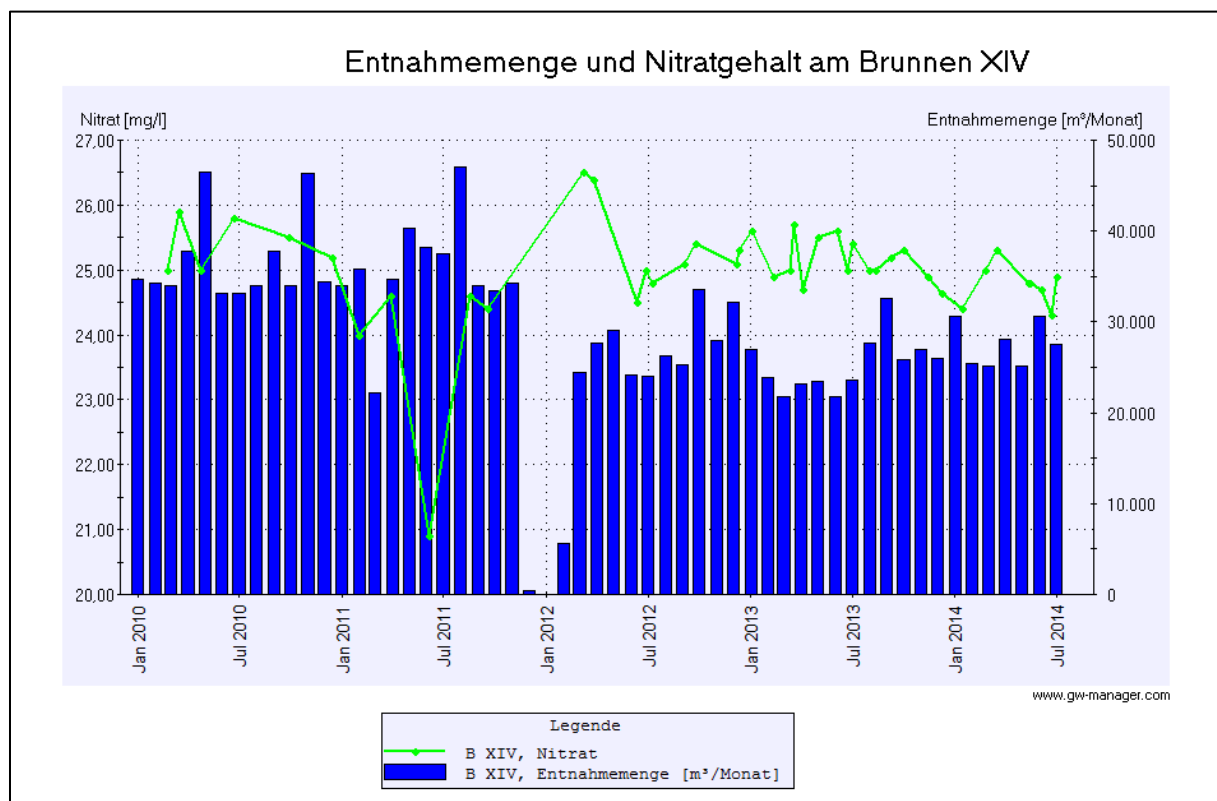


Abbildung 27: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XIV

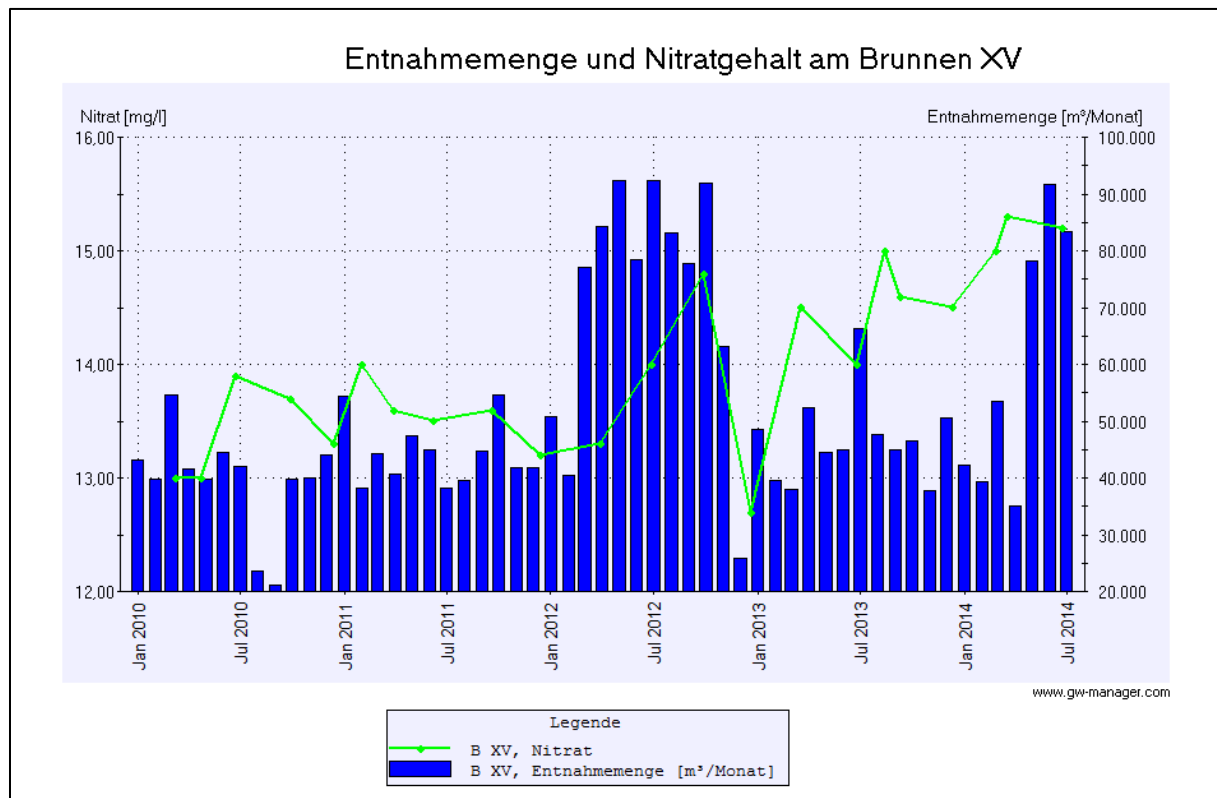


Abbildung 28: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XV

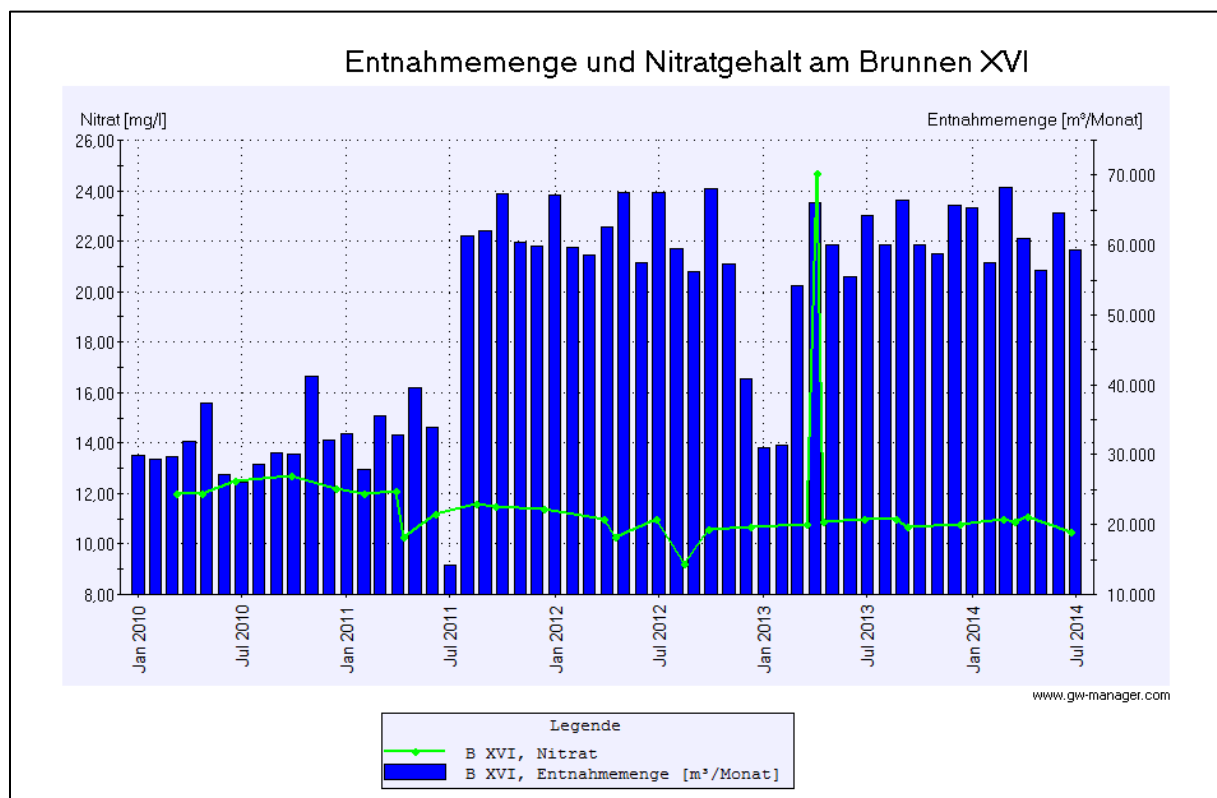


Abbildung 29: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XVI

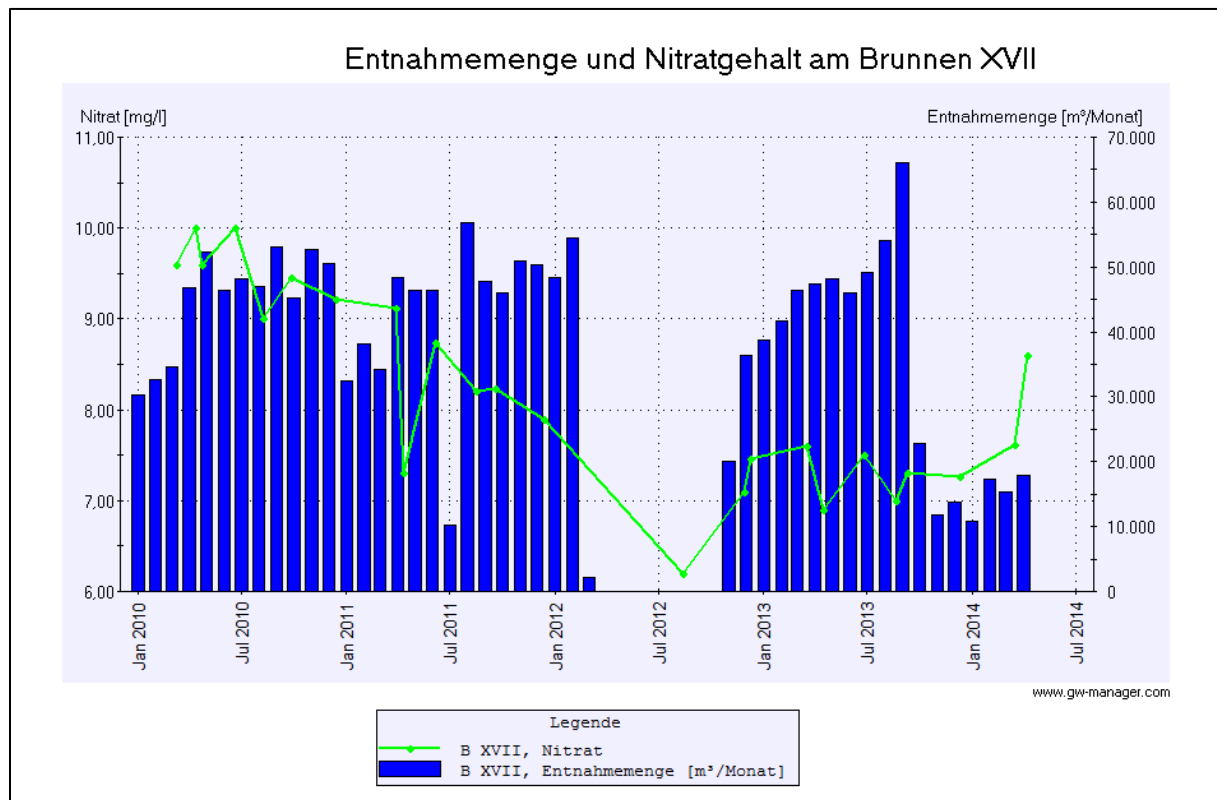


Abbildung 30: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XVII

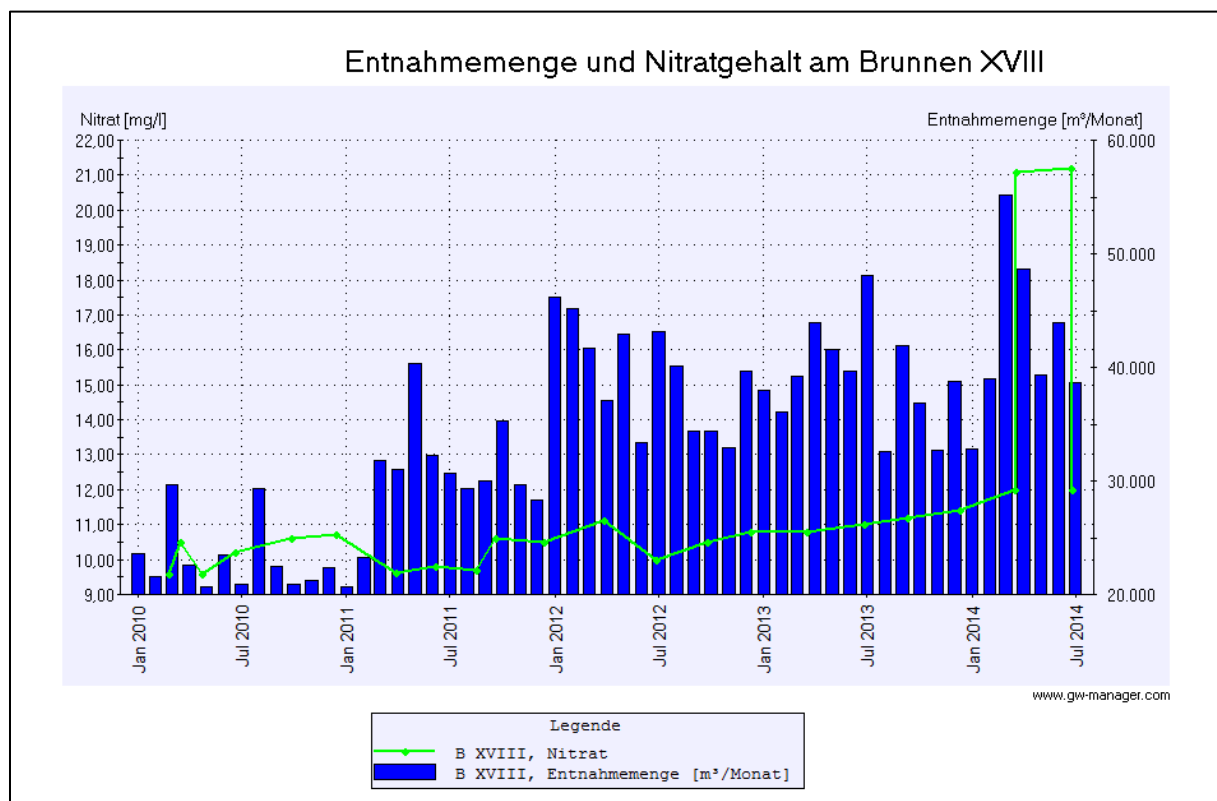


Abbildung 31: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XVIII

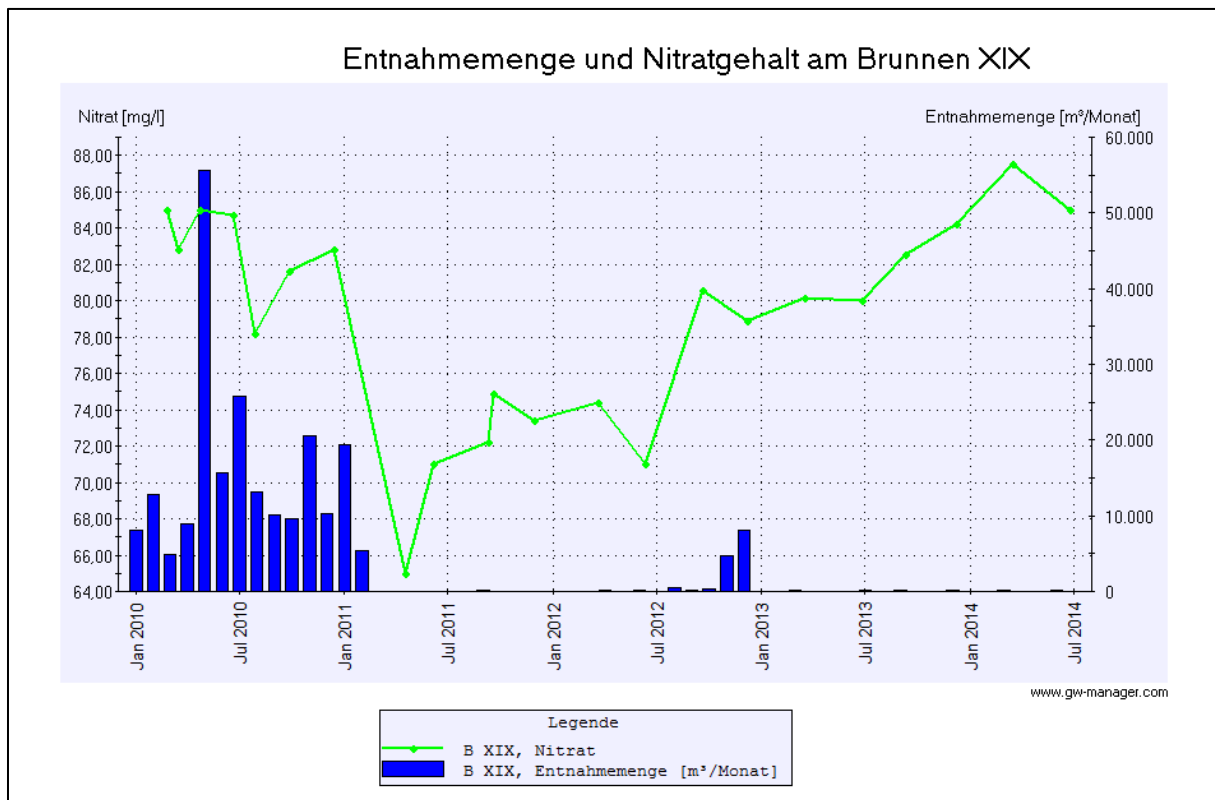


Abbildung 32: Entwicklung des Nitratgehalts am Brunnen XIX

Anlage D: Tabellen zur Ermittlung der geeigneten Fördermengen für das Szenario I

Brunnen	maximale Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/Monat]	Wasserrecht I [m³/h]	Wasserrecht II [m³/h]	Nitratgehalt [mg/l]	Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	Eisengehalt [mg/l]	Mangangehalt [mg/l]	Calciumgehalt [mg/l]	Magnesiumgehalt [mg/l]	Gesamthärte [°dH]	Σ PSM [mg/l]
VI	50	50	36.000	50	0	1	0,04	8,31	1,21	90	14	15,83	0,00000
VIIa	120	90	64.800	90	0	8,97	0,04	7,18	0,892	100	14	17,23	0,00000
VIII	80	0	0	0	0	54,7	0,04	0	0	100	10	16,31	0,00003
IX	150	150	108.000	150	0	38,9	0,04	0,035	0,0133	110	14	18,63	0,00002
X	45	45	32.400	45	0	3	0,04	2,76	0,536	110	15	18,86	0,00000
XIII	90	90	64.800	90	0	21,6	0,04	0	0	110	17	19,32	0,00002
XIV	100	0	0	0	0	24,8	0,04	0	0	75	13	13,50	0,00002
XV	95	95	68.400	0	95	15,2	0,04	0	0	82	13	14,48	0,00001
XVI	140	140	100.800	0	140	10,5	0,04	0	0	62	9,1	10,78	0,00001
XVII	160	160	115.200	0	160	8,6	0,04	0,01	0,01	42,5	6,6	7,47	0,00000
XVIII	80	80	57.600	0	80	12	0,04	0	0	38	5,9	6,68	0,00001
Ea	120	0	0	0	0	1	0,17	4,7	0,45	89	11	15,00	0,00000
G	75	75	54.000	75	0	1	0,21	4,38	0,326	64	8,8	10,99	0,00000
H	60	60	43.200	60	0	1	0,04	3,25	0,228	54	8,2	9,45	0,00000
J	60	60	43.200	60	0	1	0,04	7,46	0,498	62	10	10,99	0,00000
Summe	1425	1095	788.400	620	475	12,98	0,0516	1,98	0,22	75,73	11,01	13,14	0,00001

Tabelle 19: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario I; erste Einschaltreihenfolge

Brunnen	maximale Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/Monat]	Wasserrecht I [m³/h]	Wasserrecht II [m³/h]	Nitratgehalt [mg/l]	Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	Eisengehalt [mg/l]	Mangangehalt [mg/l]	Calciumgehalt [mg/l]	Magnesiumgehalt [mg/l]	Gesamthärte [°dH]	Σ PSM [mg/l]
VI	50	50	36.000	50	0	1	0,04	8,31	1,21	90	14	15,83	0,00000
VIIa	120	120	86.400	120	0	8,97	0,04	7,18	0,892	100	14	17,23	0,00000
VIII	80	80	57.600	80	0	54,7	0,04	0	0	100	10	16,31	0,00003
IX	150	150	108.000	150	0	38,9	0,04	0,035	0,0133	110	14	18,63	0,00002
X	45	45	32.400	45	0	3	0,04	2,76	0,536	110	15	18,86	0,00000
XIII	90	90	64.800	90	0	21,6	0,04	0	0	110	17	19,32	0,00002
XIV	100	100	72.000	0	100	24,8	0,04	0	0	75	13	13,50	0,00002
XV	95	0	0	0	0	15,2	0,04	0	0	82	13	14,48	0,00001
XVI	140	0	0	0	0	10,5	0,04	0	0	62	9,1	10,78	0,00001
XVII	160	160	115.200	0	160	8,6	0,04	0,01	0,01	42,5	6,6	7,47	0,00000
XVIII	80	80	57.600	0	80	12	0,04	0	0	38	5,9	6,68	0,00001
Ea	120	100	72.000	100	0	1	0,17	4,7	0,45	89	11	15,00	0,00000
G	75	0	0	0	0	1	0,21	4,38	0,326	64	8,8	10,99	0,00000
H	60	60	43.200	60	0	1	0,04	3,25	0,228	54	8,2	9,45	0,00000
J	60	60	43.200	60	0	1	0,04	7,46	0,498	62	10	10,99	0,00000
Summe	1425	1095	788.400	755	340	16,85	0,0519	2,30	0,26	81,32	11,42	14,02	0,00001

Tabelle 20: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario I; zweite Einschaltreihenfolge

Anlage E: Tabellen zur Ermittlung der geeigneten Fördermengen für das Szenario II

Brunnen	maximale Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/Monat]	Wasserrecht I [m³/h]	Wasserrecht II [m³/h]	Nitratgehalt [mg/l]	Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	Eisengehalt [mg/l]	Mangangehalt [mg/l]	Calciumgehalt [mg/l]	Magnesiumgehalt [mg/l]	Gesamthärte [°dH]	Σ PSM [mg/l]
I	100	100	72.000	100	0	1	0,13	8,81	0,612	84	11	14,30	0,00001
II	20	0	0	0	0	1	0,07	13,00	0,743	94	14	16,39	0,00001
IIIa	150	150	108.000	150	0	1	0,04	8,79	0,449	66	8,6	11,22	0,00001
IVa	150	0	0	0	0	1	0,04	5,64	0,373	54	6,5	9,06	0,00001
Va	150	20	14.400	20	0	1	0,04	6,36	0,366	49	5,4	8,11	0,00001
VI	50	50	36.000	50	0	1	0,04	8,31	1,21	90	14	15,83	0,00001
VIIa	120	80	57.600	80	0	8,97	0,04	7,18	0,892	100	14	17,23	0,00001
VIII	80		0	0	0	54,7	0,04	0	0	100	10	16,31	0,00003
IX	150	150	108.000	150	0	38,9	0,04	0,035	0,0133	110	14	18,63	0,00002
X	45	0	0	0	0	3	0,04	2,76	0,536	110	15	18,86	0,00001
XIII	90	90	64.800	90	0	21,6	0,04	0	0	110	17	19,32	0,00002
XIV	100	100	72.000	0	100	24,8	0,04	0	0	75	13	13,50	0,00002
XV	95	95	68.400	0	95	15,2	0,04	0	0	82	13	14,48	0,00001
XVI	140	90	64.800	0	90	10,5	0,04	0	0	62	9,1	10,78	0,00001
XVII	160	0	0	0	0	8,6	0,04	0,01	0,01	42,5	6,6	7,47	0,00001
XVIII	80	80	57.600	0	80	12	0,04	0	0	38	5,9	6,68	0,00001
Ea	120	30	21.600	30	0	1	0,17	4,7	0,45	89	11	15,00	0,00001
G	75	0	0	0	0	1	0,21	4,38	0,326	64	8,8	10,99	0,00001
H	60	0	0	0	0	1	0,04	3,25	0,228	54	8,2	9,45	0,00001
J	60	60	43.200	60	0	1	0,04	7,46	0,498	62	10	10,99	0,00001
Summe	1995	1095	788.400	730	365	13,46	0,0518	3,57	0,29	80,80	11,60	13,99	0,00001

Tabelle 21: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario II; erste Einschaltreihenfolge

Brunnen	maximale Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/Monat]	Wasserrecht I [m³/h]	Wasserrecht II [m³/h]	Nitratgehalt [mg/l]	Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	Eisengehalt [mg/l]	Mangangehalt [mg/l]	Calciumgehalt [mg/l]	Magnesiumgehalt [mg/l]	Gesamthärte [°dH]	Σ PSM [mg/l]
I	100	0	0	0	0	1	0,13	8,81	0,612	84	11	14,30	0,00001
II	20	20	14.400	20	0	1	0,07	13,00	0,743	94	14	16,39	0,00001
IIIa	150	0	0	0	0	1	0,04	8,79	0,449	66	8,6	11,22	0,00001
IVa	150	90	64.800	90	0	1	0,04	5,64	0,373	54	6,5	9,06	0,00001
Va	150	150	108.000	150	0	1	0,04	6,36	0,366	49	5,4	8,11	0,00001
VI	50	0	0	0	0	1	0,04	8,31	1,21	90	14	15,83	0,00001
VIIa	120	120	86.400	120	0	8,97	0,04	7,18	0,892	100	14	17,23	0,00001
VIII	80	80	57.600	80	0	54,7	0,04	0	0	100	10	16,31	0,00003
IX	150	0	0	0	0	38,9	0,04	0,035	0,0133	110	14	18,63	0,00002
X	45	45	32.400	45	0	3	0,04	2,76	0,536	110	15	18,86	0,00001
XIII	90	90	64.800	90	0	21,6	0,04	0	0	110	17	19,32	0,00002
XIV	100	100	72.000	0	100	24,8	0,04	0	0	75	13	13,50	0,00002
XV	95	0	0	0	0	15,2	0,04	0	0	82	13	14,48	0,00001
XVI	140	140	100.800	0	140	10,5	0,04	0	0	62	9,1	10,78	0,00001
XVII	160	45	32.400	0	45	8,6	0,04	0,01	0,01	42,5	6,6	7,47	0,00001
XVIII	80	80	57.600	0	80	12	0,04	0	0	38	5,9	6,68	0,00001
Ea	120	0	0	0	0	1	0,17	4,7	0,45	89	11	15,00	0,00001
G	75	75	54.000	75	0	1	0,21	4,38	0,326	64	8,8	10,99	0,00001
H	60	60	43.200	60	0	1	0,04	3,25	0,228	54	8,2	9,45	0,00001
J	60	0	0	0	0	1	0,04	7,46	0,498	62	10	10,99	0,00001
Summe	1995	1095	788.400	730	365	12,08	0,0522	2,95	0,25	71,34	9,91	12,27	0,00001

Tabelle 22: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen für das Szenario II; zweite Einschaltreihenfolge

Anlage F: Tabellen zur Ermittlung der geeigneten Fördermengen mittels eines Ersatzbrunnens

Brunnen	maximale Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/Monat]	Wasserrecht I [m³/h]	Wasserrecht II [m³/h]	Nitratgehalt [mg/l]	Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	Eisengehalt [mg/l]	Mangangehalt [mg/l]	Calciumgehalt [mg/l]	Magnesiumgehalt [mg/l]	Gesamthärte [°dH]	Σ PSM [mg/l]
I	100	100	72.000	100	0	1	0,13	8,81	0,612	84	11	14,30	0,00001
II	20	0	0	0	0	1	0,07	13,00	0,743	94	14	16,39	0,00001
IIIa	150	150	108.000	150	0	1	0,04	8,79	0,449	66	8,6	11,22	0,00001
IVa	150	0	0	0	0	1	0,04	5,64	0,373	54	6,5	9,06	0,00001
Va	150	25	18.000	25	0	1	0,04	6,36	0,366	49	5,4	8,11	0,00001
VI	50	0	0	0	0	1	0,04	8,31	1,21	90	14	15,83	0,00001
VIIa	120	80	57.600	80	0	8,97	0,04	7,18	0,892	100	14	17,23	0,00001
VIII	80	0	0	0	0	54,7	0,04	0	0	100	10	16,31	0,00003
IX	150	150	108.000	150	0	38,9	0,04	0,035	0,0133	110	14	18,63	0,00002
X	45	45	32.400	45	0	3	0,04	2,76	0,536	110	15	18,86	0,00001
XIII	90	90	64.800	90	0	21,6	0,04	0	0	110	17	19,32	0,00002
XIV	100	100	72.000	0	100	24,8	0,04	0	0	75	13	13,50	0,00002
XV	95	95	68.400	0	95	15,2	0,04	0	0	82	13	14,48	0,00001
XVI	140	0	0	0	0	10,5	0,04	0	0	62	9,1	10,78	0,00001
XVII	160	90	64.800	0	90	8,6	0,04	0,01	0,01	42,5	6,6	7,47	0,00001
Ersatzbr.	100	80	57.600	0	80	20	0,04	0	0	78	13	13,92	0,00001
Ea	120	30	21.600	30	0	1	0,17	4,7	0,45	89	11	15,00	0,00001
G	75	0	0	0	0	1	0,21	4,38	0,326	64	8,8	10,99	0,00001
H	60	0	0	0	0	1	0,04	3,25	0,228	54	8,2	9,45	0,00001
J	60	60	43.200	60	0	1	0,04	7,46	0,498	62	10	10,99	0,00001
Summe	2015	1095	788.400	730	365	13,97	0,0518	3,34	0,26	82,76	11,92	14,34	0,00001

Tabelle 23: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen mit Ersatzbrunnen; erste Einschaltreihenfolge

Brunnen	maximale Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/h]	Fördermenge [m³/Monat]	Wasserrecht I [m³/h]	Wasserrecht II [m³/h]	Nitratgehalt [mg/l]	Clofibrinsäuregehalt [µg/l]	Eisengehalt [mg/l]	Mangangehalt [mg/l]	Calciumgehalt [mg/l]	Magnesiumgehalt [mg/l]	Gesamthärte [°dH]	Σ PSM [mg/l]
I	100	0	0	0	0	1	0,13	8,81	0,612	84	11	14,30	0,00001
II	20	20	14.400	20	0	1	0,07	13,00	0,743	94	14	16,39	0,00001
IIIa	150	0	0	0	0	1	0,04	8,79	0,449	66	8,6	11,22	0,00001
IVa	150	40	28.800	40	0	1	0,04	5,64	0,373	54	6,5	9,06	0,00001
Va	150	150	108.000	150	0	1	0,04	6,36	0,366	49	5,4	8,11	0,00001
VI	50	50	36.000	50	0	1	0,04	8,31	1,21	90	14	15,83	0,00001
VIIa	120	120	86.400	120	0	8,97	0,04	7,18	0,892	100	14	17,23	0,00001
VIII	80	80	57.600	80	0	54,7	0,04	0	0	100	10	16,31	0,00003
IX	150	0	0	0	0	38,9	0,04	0,035	0,0133	110	14	18,63	0,00002
X	45	45	32.400	45	0	3	0,04	2,76	0,536	110	15	18,86	0,00001
XIII	90	90	64.800	90	0	21,6	0,04	0	0	110	17	19,32	0,00002
XIV	100	100	72.000	0	100	30	0,04	0	0	75	13	13,50	0,00002
XV	95	0	0	0	0	15,2	0,04	0	0	82	13	14,48	0,00001
XVI	140	105	75.600	0	105	10,5	0,04	0	0	62	9,1	10,78	0,00001
XVII	160	160	115.200	0	160	10	0,04	0,01	0,01	42,5	6,6	7,47	0,00001
Ersatzbr.	100	0	0	0	0	20	0,04	0	0	78	13	13,92	0,00001
Ea	120	0	0	0	0	1	0,17	4,7	0,45	89	11	15,00	0,00001
G	75	75	54.000	75	0	1	0,21	4,38	0,326	64	8,8	10,99	0,00001
H	60	60	43.200	60	0	1	0,04	3,25	0,228	54	8,2	9,45	0,00001
J	60	0	0	0	0	1	0,04	7,46	0,498	62	10	10,99	0,00001
Summe	2015	1095	788.400	730	365	12,45	0,0522	3,07	0,29	72,68	10,23	12,54	0,00001

Tabelle 24: Berechnungstabelle der Fördermengen inklusive der Konzentrationen mit Ersatzbrunnen; zweite Einschaltreihenfolge

Anlage G: Bilder von Eisen- und Manganablagerungen in Leitungsrohren

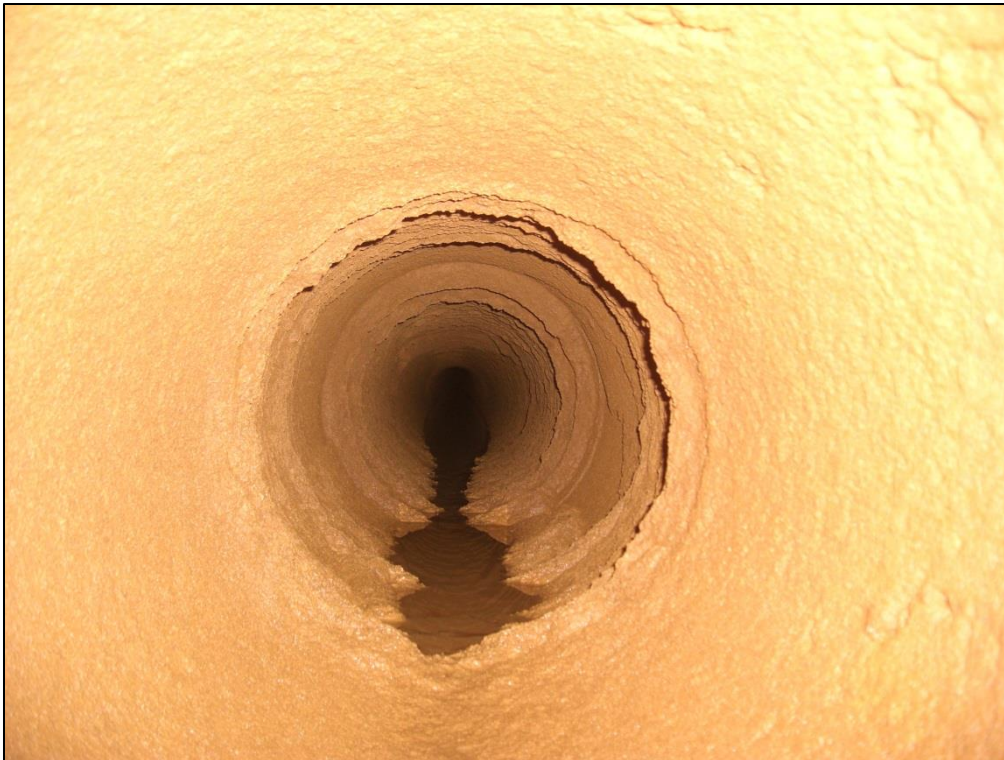


Abbildung 33: Ablagerungen in der Sammelleitung der Brunnen I-Va (1)



Abbildung 34: Ablagerungen in der Sammelleitung der Brunnen I-Va (2)



Abbildung 35: Ablagerungen in einem Leitungsrohr des Ortsnetzes des Wasserwerks A

Anlage H: Darstellung der Berechnungsergebnisse mittels STANET

Bezeichnung	Innendurchmesser	Nennweite	Rauheit	Geschwindigkeit	Rohrtyp	Durchfluss	Druck, berechnet
	mm	mm	mm	m/s		m³/h	bar
Leitung Va-IVa	130	200	35	0,472	200 GJS	22,552	4,5508
Leitung Va-IVa	130	200	35	0,472	200 GJS	22,552	5,8204
Leitung Va-IVa	130	200	35	0,472	200 GJS	22,552	6,4741
Leitung IVa-IIIa	200	250	35	0,1994	250 GJS	22,552	7,9455
Leitung IIIa-II	200	250	35	1,3023	250 GJS	147,291	7,8801
Leitung II-I	200	250	35	1,3023	250 GJS	147,291	8,6526
Leitung II-I	200	250	35	1,3023	250 GJS	147,291	9,0153
Leitung I	200	250	35	2,1204	250 GJS	239,81	9,4913

Tabelle 25: Daten und Ergebnisse der STANET-Simulation der ehemaligen Sammelleitung

Bezeichnung	Innendurchmesser	Nennweite	Rauheit	Geschwindigkeit	Rohrtyp	Durchfluss	Druck, berechnet
	mm	mm	mm	m/s		m³/h	bar
Leitung Va-IVa	229	280	0,2	0,2563	229 PE-HD	38,000	1,4364
Leitung Va-IVa	229	280	0,2	0,2563	229 PE-HD	38,000	1,3497
Leitung Va-IVa	229	280	0,2	0,2563	229 PE-HD	38,000	1,366
Leitung IVa-IIIa	313	355	0,2	0,1372	313 PE-HD	38,000	0,9985
Leitung IIIa-II	313	355	0,2	0,6909	313 PE-HD	191,378	1,0247
Leitung II-I	313	355	0,2	0,6909	313 PE-HD	191,378	0,9182
Leitung II-I	313	355	0,2	0,6909	313 PE-HD	191,378	1,0723
Leitung I	313	355	0,2	1,0641	313 PE-HD	294,753	1,0922

Tabelle 26: Daten und Ergebnisse der STANET-Simulation der aktuellen Sammelleitung

Auf den folgenden zwei Seiten befindet sich der Leitungsplan der Sammelleitung der Brunnen I-Va inklusive der Durchflüsse, Art der Leitung und berechneter Geschwindigkeit. Dabei zeigt der erste Plan die Berechnungsergebnisse der ehemaligen Sammelleitung, das heißt der gusseisernen Rohre und der zweite Plan den aktuellen (sanierten) Leitungszustand.



Quellenverzeichnis

Literatur

KARGER, ROSEMARIE; CORD-LANDWEHR, KLAUS; HOFFMANN, FRANK (2008): „Wasserversorgung“, 13. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag

MUTSCHMANN, JOHANN; STIMMELMAYR, FRITZ (2002): „Taschenbuch der Wasserversorgung“, 13. Auflage, Wiesbaden: Vieweg Verlag

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2005): „Arzneimittelbericht Südhessen 1996-2000 – Hydrologie Hessen“, Stand: April 2005

Internetquellen

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE: „8 Strömungen in Rohrleitungen“ (o. J.), Institut für Hydromechanik
<http://hydro.ifh.uni-karlsruhe.de/download/Kap08ps.pdf> (11.09.2014)

Quelle A

SCHEYTT, TRAUGOTT: „Arzneimittel im Grundwasser: Bedeutung von Spurenstoffen im aquatischen System“ (2011)
http://www.geo-union.de/fileadmin/downloads_geounion/LWEL2011_Vortrag_Scheytt.pdf (Stand: 03.07.2014)

STANET Netzberechnung
<http://stafu.de/> (25.08.2014)

UMWELTBUNDESAMT: „Zu viel Nitrat im Grundwasser. Im Trinkwasser kein Problem!“ (2014)
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/zu-viel-nitrat-im-grundwasser-im-trinkwasser-kein> (Stand: 02.07.2014)

UMWELTBUNDESAMT: „Arzneimittelwirkstoffe im Wasserkreislauf“ (o. J.)
http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/schadstoff/schadstoffe_einleitung/azm/ (Stand: 03.07.2014)

UMWELTBUNDESAMT: „Bewertung der Anwesenheit teil- oder nicht bewertbarer Stoffe im Trinkwasser aus gesundheitlicher Sicht“ (März 2003)
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/gow-empfehlung_2003_46.pdf (09.09.2014)

UMWELTBUNDESAMT: „Liste der nach GOW bewerteten Stoffe“ (Januar 2014)
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet/toxikologie-des-trinkwassers> (19.09.2014)

Sonstige Quellen

BRÄUNIG, JENS (2007): „Clofibrinsäureuntersuchungen im Einzugsgebiet von Brunnen G – Statusbericht“, Diplomarbeit

BRANDT GERDES SITZMANN UMWELTPLANUNG GMBH (2012): „Ersatzstandort für Brunnen XVIII und Optimierung der Einzugsgebiete unter Vermeidung qualitativer Risiken“

Deutsche Norm, DIN 2000: 2000-10: „Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen“

DVGW Regelwerk, Technische Regel Arbeitsblatt W 223-1 (Februar 2005): Enteisung und Entmanganung; Teil 1: Grundsätze und Verfahren

NIESLER, DENNIS (2013): „Belastung des Grundwasserleiters mit Nitrat im Einzugsbereich der Brunnen XIV-XIX des Wasserwerks A“, Bachelorarbeit

Rohwasseruntersuchungsverordnung in der Fassung vom 22. Januar 1990 (GVBl. I S. 114), geändert durch Gesetz vom 26. Juni 1990 (GVBl. I S. 197)

Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), die durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist

Eidesstattliche Erklärung

Abschlussarbeit von:

Vera Behle

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 06. 10. 2014

Behle

Unterschrift
